INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



FILOGENIA DEL PANDA

Enero 1988
450 PTAS.

Número 136
Enero 1988

INVESTIGACION Y
CIENCIA *Edición en español de* SCIENTIFIC AMERICAN

8 **DIETA Y CANCER, Leonard A. Cohen**
¿Están fundadas las recomendaciones sobre la dieta dictadas para evitar la incidencia del cáncer?

16 **SUPERNOVAS RICAS EN HELIO, J. Craig Wheeler y Robert P. Harkness**
El descubrimiento de 1987 ha puesto en tela de juicio la actual clasificación de las supernovas.

26 **CROMOSOMAS ARTIFICIALES, Andrew W. Murray y Jack W. Szostak**
La biología está avanzando de la manipulación de genes hacia la de cromosomas enteros.

38 **RADIACION DE SINCROTRON, Herman Winick**
Aprovechamiento de la misma por parte de la exploración médica y la industria informática.

50 **GENEALOGIA DEL PANDA GIGANTE, Stephen J. O'Brien**
La nueva técnica de hibridación del ADN permite aclarar ese antiguo enigma taxonómico.

60 **DEMONIOS, MOTORES Y LA SEGUNDA LEY, Charles H. Bennett**
Desde 1871 los físicos se vienen afanando por exorcizar al diablo de James Clerk Maxwell.

70 **LOS COMIENZOS DE LA AGRICULTURA EN EL NOROESTE DE EUROPA, John M. Howell**
La cartografía arqueológica brinda una nueva interpretación de la revolución social neolítica.

78 **LA INTERFASE GAS-LIQUIDO, Claudi Mans, Joan Llorens y José Costa López**
El estudio termodinámico de los rasgos de esa interfase ayuda a entender la tensión superficial.

3 AUTORES
4 HACE...
32 CIENCIA Y SOCIEDAD
88 JUEGOS DE ORDENADOR
94 TALLER Y LABORATORIO
100 LIBROS
104 BIBLIOGRAFIA

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Ana M. García García: *Dieta y cáncer*; Manuel Puigcerver: *Supernovas ricas en helio*; Santiago Torres Martínez: *Cromosomas artificiales*; Ramón Pascual: *Radiación de sincrotrón*; Manuel Crespo: *Genealogía del panda gigante*; Josep-Enric Llebot: *Demonios, motores y la segunda ley*; Antonio Blanco Freijeiro: *Los comienzos de la agricultura en el noroeste de Europa*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Luis Alonso, Teodoro Roca, Abel Mariné, M. Carmen Vidal y M. Luz Izquierdo.



PORTADA

La ilustración de portada muestra un panda gigante y el que constituye su principal alimento, la caña de bambú (véase "Genealogía del panda", por Stephen J. O'Brien, en este mismo número). Las relaciones filogenéticas del panda se han visto oscurecidas por su hábito casi exclusivamente vegetariano y porque presenta rasgos anatómicos y de conducta que le permiten subsistir con una dieta limitada al bambú. Tras casi un siglo de discusiones sobre la historia evolutiva de la filogenia del panda gigante, que tan pronto lo emparentaban con el mapache como lo adscribían a la familia de los osos, las modernas técnicas del análisis molecular parecen haber puesto punto final al debate.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:
Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

Distribución para España:
MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid
Teléfono 652 42 00

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3.°, 3.ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



Controlado por O.J.D.

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada de Marvin Mattelson

Página	Fuente	Página	Fuente
8	Carol Donner		Engineering
9-14	Andrew Christie		Company (*derecha*)
16	John F. Kielkopf	46-47	George Retseck
18-23	Ian Worpole	50-51	Jessie Cohen, Parque
24	Observatorio Meridional		Zoológico Nacional,
	Europeo (*arriba*), Ian		Washington, D.C.
	Worpole (*abajo*)	54	Johnny Johnson
27	Philip Hieter,	55	Patricia J. Wynne
	Facultad de Medicina de la	56	Stephen J. O'Brien
	Universidad Johns Hopkins	58	Patricia J. Wynne
28-31	Hank Iken	61	James Kilkelly y R. Bruce
33	J. Georg Bednorz, K. Alex		Laughlin
	Müller/Spektrum der	62-66	Jerome Kuhl
	Wissenschaft	70-71	Ian Kinnes, British Museum
34	Spektrum der Wissenschaft	72-77	Tom Prentiss
39	Laboratorio Lawrence	79	C. Mans, J. Llorens y J.
	Berkeley		Costa-López
40-41	George Retseck	80-84	C. Mans, J. Llorens, J.
45	Keith Moffat, Universidad		Costa-López y Magda Mària
	de Cornell (*izquierda*);	85	C. Mans, J. Llorens y J.
	Janos Kirz, Universidad		Costa-López
	estatal de Nueva York en	89-92	Heinz-Otto Peitgen y Peter
	Stony Brook (*centro*);		H. Richter, Universidad de
	Corporate Research		Bremen
	Laboratory, Exxon	95	Jearl Walker
	Research and	96-97	Michael Goodman

ISSN 0210-136X — Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por
Reprostudy, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

LEONARD A. COHEN ("Dieta y cáncer") estudia las interacciones entre los alimentos y el cáncer en el Instituto Naylor Dana de Prevención de Enfermedades, de la Fundación Americana de la Salud. Tras cursar el primer ciclo de carrera en la Universidad de Wisconsin en Madison, que finalizó en 1960, estudió en el Brooklyn College y en el Instituto Sloan-Kettering de Investigación del Cáncer; en 1972 se recibió de doctor por la Universidad de la Ciudad de Nueva York. El año siguiente se trasladó al Instituto Naylor Dana, centrándose las investigaciones que allí realizó en las relaciones entre la grasa de los alimentos y el cáncer de mama; en 1984 fue nombrado jefe de la sección de endocrinología de la alimentación.

J. GRAIG WHEELER y ROBERT P. HARKNESS ("Supernovas ricas en helio") trabajan juntos en el departamento de astronomía de la Universidad de Texas en Austin. Wheeler ocupa la plaza Samuel T. y Fern Yanagisawa Regents de astronomía y dirige el departamento. Licenciado en física por el Instituto de Tecnología de Massachusetts, se doctoró, también en física, por la Universidad de Colorado. Visitó en breves ocasiones el Instituto de Tecnología de California, como investigador asociado, y la Universidad de Harvard, como profesor agregado, ingresando posteriormente en el claustro docente de Austin, donde alcanzó la cátedra en 1980. Harkness se licenció en astronomía y física en el University College de Londres, en 1977; en 1981 se doctoró en astronomía por la Universidad de Oxford. En el curso de las investigaciones de postdoctorado que realizó en Oxford, desarrolló técnicas numéricas para calcular el intercambio de radiación dentro de las supernovas. En Austin, Harkness colabora, en calidad de científico investigador, con el departamento de astronomía y con el Centro Universitario de Cálculo de Alto Rendimiento.

ANDREW W. MURRAY y JACK W. SZOSTAK ("Cromosomas artificiales") se dedican, desde 1982, a la construcción de cromosomas artificiales de levaduras. Murray, que en 1978 finalizó el primer ciclo de carrera en la Universidad de Cambridge, se incorporó en 1980, como alumno de licenciatura, en el laboratorio de Szostak en el Instituto del Cáncer Dana Faber y la Facultad de Medicina de Harvard. Se doctoró en 1984 y trabajó con Szostak como becario postdoctoral hasta que, en 1986, se trasladó a la Universidad de California, en San Francisco. Szostak se licenció en ciencias por la Universidad McGill en 1972, recibiéndose de doctor por la de Cornell en 1977; en esa institución trabajó sobre la recombinación en levaduras. En 1979 se trasladó al Instituto Dana Farber y la Facultad de Medicina de Harvard. En 1984 entró en el departamento de genética del Hospital General de Massachusetts, siendo nombrado profesor adjunto de la Facultad de Medicina.

HERMAN WINICK ("Radiación de sincrotrón") es profesor del departamento de física aplicada de la Universidad de Stanford y subdirector de su Laboratorio de Radiación de Sincrotrón. Formado en la Universidad de Columbia, donde prosiguió sus investigaciones después de licenciarse, se doctoró en física de altas energías en 1957. Trabajó primero en la Universidad de Rochester y después en la de Harvard, donde se integró en la plantilla de científicos del Acelerador de Electrones de Cambridge.

STEPHEN J. O'BRIEN ("Genealogía del panda gigante") se ha dedicado a investigar el tema que aborda en su artículo desde que, en 1983, le pidieron que determinara la paternidad de un cachorro de la célebre Ling-Ling, del Parque Zoológico Nacional de Washington. Tras doctorarse por la Universidad de Cornell, en 1971, se especializó, trabajando para el Instituto Nacional estadounidense del Cáncer (NCI), en evolución molecular y genética de las células somáticas de mamíferos. En 1973 se trasladó al Laboratorio de Carcinogénesis Vírica del NCI, del que fue nombrado director en 1986. O'Brien es copresidente del Comité Internacional de Cartografía Génica Comparada y redactor de la revista *Genetic Maps*; fue coautor del artículo "El guepardo, en peligro de extinción genética", publicado en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA en julio de 1986.

CHARLES H. BENNET ("Demonios, motores y la segunda ley") forma parte del equipo de investigadores del centro de investigación Thomas J. Watson que la compañía IBM tiene en Yorktown Heights, Nueva York. Formado en la Universidad de Brandeis, se doctoró en química física por la de Harvard, en 1970. Trabajó durante dos años en el Laboratorio Nacional norteamericano Argonne y se incorporó a IBM en 1972. Su interés científico se ha centrado en la teoría matemática del azar y en la relación entre la mecánica estadística y la teoría de la computación. Bennet fue coautor de "Los límites físicos fundamentales de la computación", aparecido en el número de septiembre de 1985 de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA.

JOHN M. HOWELL ("Los comienzos de la agricultura en el noroeste de Europa") es un acreditado estudioso del Neolítico en Europa. Dictó arqueología prehistórica en la Universidad de Edimburgo, bajo la tutela de Stuart Piggot, antes de emprender sus investigaciones de doctorado en la Universidad de Oxford. Tras desarrollar una extensa labor de campo en el este y en el oeste de Europa, ha realizado emisiones radiofónicas sobre la arqueología de aquellos países para la BBC, y es autor de *Settlement and Economy in Neolithic Northern France*. Howell es miembro asociado de arqueología prehistórica de la Universidad de Liverpool, pero "debido a la falta de plazas universitarias en el Reino Unido" trabaja también como asesor de tasas internacionales para una compañía financiera de Londres.

CLAUDI MANS, JOAN LLORENS y JOSE COSTA LOPEZ ("La interfase gas-líquido") son profesores de ingeniería química de la Universidad de Barcelona. Las tesis doctorales de los tres están relacionadas con la transferencia de materia en la interfase gas-líquido. Mans obtuvo el VII premio Jordi Camp a la investigación en tensioactivos con Salvador Plaja en 1978 y desde 1986 es catedrático de la Universidad de Barcelona. A Llorens se le otorgó el premio Jordi Camp en su undécima edición (1982). Trabajó en el departamento de investigación y control de la empresa Gres Catalán, S. A. hasta 1985, fecha en que se incorporó al mencionado centro de estudios. Costa López cursó la carrera de química en la Universidad de Valencia, realizó investigaciones de ingeniería química en el Institut du Génie Chimique de Toulouse y se doctoró por la Universidad de Madrid. Desde 1967 es catedrático de la Universidad de Barcelona.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Francisco Díaz publicó su *Tratado de todas las enfermedades de los Riñones, Vexiga y Carnosidades de la Verga, y Urina*, generalmente considerado como el punto de partida de la urología moderna.

Nacido en la localidad burgalesa de Rioseras hacia 1530, Díaz estudió en la Universidad de Alcalá, donde obtuvo el título de bachiller en medicina (1551) y, más tarde, los de licenciado (1555) y doctor (1559). Sus principales maestros fueron Fernando Mena y Francisco Valles, destacadas figuras del galenismo humanista e hipocratista. Valles le transmitió, además, su interés por la nueva anatomía vesaliana, que Díaz estudió bajo la dirección de Pedro Jimeno y de Luis Collado, cabezas de la escuela anatómica valenciana: "Ximeno, doctísimo valenciano y el primero que con elegancia y erudición y gran destreza comenzó a poner la ejecución de cortar y hacer anatomía en la ciudad de Valencia, donde tanto resplandece la medicina y la anatomía al presente... y no tengo yo poca jactancia de haber gastado en esta ciudad algún tiempo, y tener por maestro al peritísimo doctor Collado y al doctor Ximeno". Terminados sus estudios, ejerció la profesión en Burgos hasta 1570, fecha en la que se trasladó a Madrid como cirujano de cámara de Felipe II, cargo que ocupó hasta su muerte en 1590.

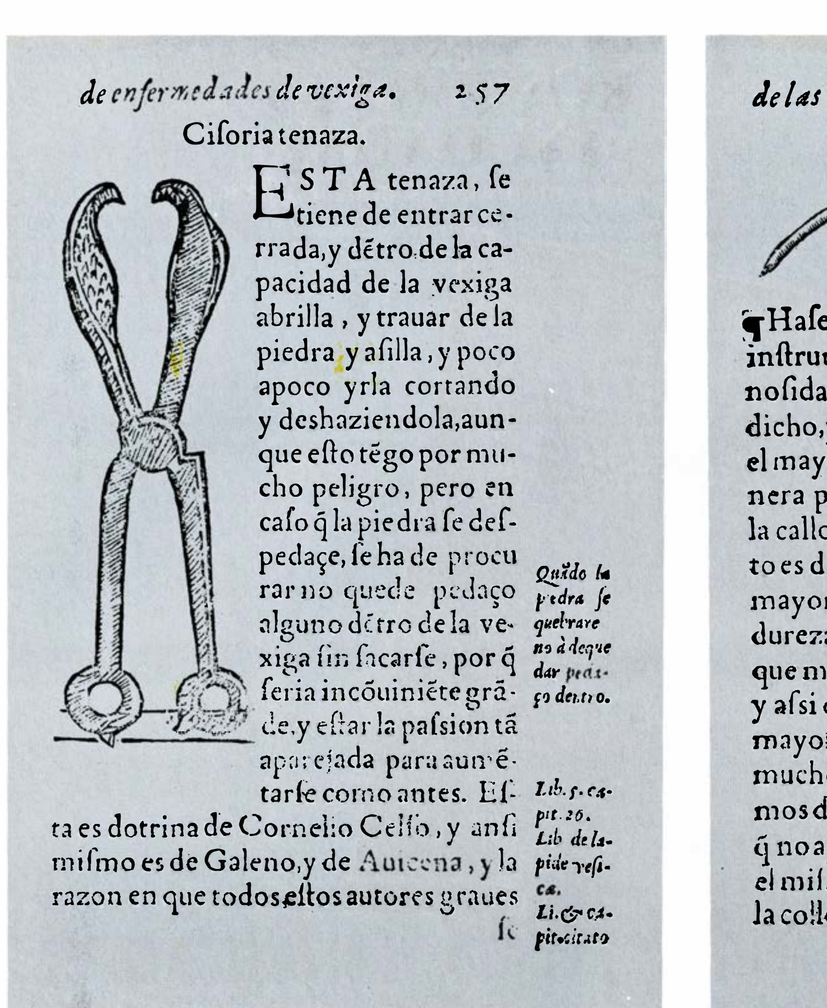
De todos los cirujanos españoles del siglo XVI, Díaz es el que dispuso de una información científica más rica y actualizada, como lo demuestran las citas de sus libros y el contenido de su biblioteca, en la que figuraban ejemplares de las obras más representativas de las nuevas orientaciones de la cirugía, la medicina, la anatomía y la historia natural.

Su primera publicación fue un *Compendio de Chirurgia* (1575) destinado a los cirujanos romancistas. Incluye un excelente resumen "de la anatomía del cuerpo humano", el estudio de los "apostemas", las "heridas" y las "úlceras" –como era habitual en los textos quirúrgicos de la época– y un interesante "Tratado de cuatro enfermedades": la "ninfea" o hipertrofia del clítoris, las "hernias", las "almorranas" y la "flema salada que llaman empeines". Dejó también manuscrito un tratado de anatomía, al que se refiere en los siguientes términos en 1588: "Prometo sacar mi Anatomía que de todo el cuerpo humano tengo compuesta, donde procederé más a la larga, sin dejar cosa que a este negocio toque sin declarar". El relieve histórico de Díaz se debe, sin embargo, a su *Tratado de todas las enfermedades de los Riñones, Vexiga, y Carnosidades de la Verga, y Urina* (1588), por el que el conocido repertorio de clásicos médicos de Garrison y Morton califican al cirujano burgalés de "father of modern urology".

La base doctrinal del *Tratado* es el galenismo en su versión "hipocratista", que había situado en primer plano la observación clínica bajo la inspiración de los escritos hipocráticos. Ello no excluye un interés inicial por el paracelsismo, que Riera ha detectado en ciertas expresiones utilizadas por Díaz, que cita explícitamente a Paracelso. La presencia en su biblioteca de un ejemplar de la traducción latina de *Die grosse Wundarzney* habla también en el mismo sentido. Por otra parte, la importancia que concedía a la nueva morfología se refleja en los capítulos acerca de la anatomía de los riñones, la vejiga y los genitales masculinos que encabezan los tres "libros" de la obra.

El estudio clínico de las afecciones urológicas lo fundamenta en "observationes" propias, muchas de ellas con informe de autopsia. Una de ellas corresponde a la última enfermedad de su maestro Fernando de Mena: "No parezca a nadie cosa superflua traer aquí estas historias, pues son causa de lumbre para entender el daño que traemos entre las manos, y por eso contaré otro caso que aconteció en esta corte y que hay hoy muchos testigos que le vieron y tuvieron en las manos la piedra. Lo cual es que estaba en la Corte del Cristianísimo Rey Don Felipe un médico de su cámara, cuyo nombre era el Doctor Mena, que había sido catedrático en Alcalá de Henares, de Cátedra de Prima de Medicina, grandísimo letrado, de gran autoridad y cristiandad; el cual, desde la jornada de Monzón, y antes, había sentido grande mal de urina, al fin señales todas de piedra; y habiéndose tocado de todas maneras, por dedo, candelas, plomo, quedó tan persuadido que no tenía piedra que, viendo su fatiga, comenzó a curarse con cierto artífice, el cual le persuadió tenía carnosidades, que no las tenía más que yo en los ojos. Al fin, con el deseo de sanar, le comenzó a curar por ellas, con candelillas de cáustico; por estar desengañado de un maestro de Curiel, se dejó engañar de estotro y, puesta la candela, le hallaba con gravísimo dolor, sin jamás quererme crecer; y como tenía ardor de urina y candelilla con cáustico, se le encendió una calentura y fue de manera que le fue creciendo, hasta que acabó su vida... Fue abierto, y le hallamos una piedra de ocho onzas y más, puesta entre las dos túnicas de la vejiga... Y pudiera ser que si no se moviera, no se encendiera ni muriera tan presto, y es cierto que en el proceso de la cura se lo avisé muchas veces y jamás fui creído, y quizá por ser discípulo." Entre las demás destacan quizá dos, la primera de las cuales se refiere a una "llaga de los riñones": "Juan Velázquez, caballero del hábito de Santiago y del Consejo de las Ordenes, varón clarísimo que, habiendo padecido un gravísimo ardor de urina, con sospecha de gravísimos médicos que tenía piedra, aunque no fundados en las señales que ansí discretísimamente dijeron su parecer, sólo el licenciado Ruy García

dijo no tener piedra en riñón, ni en vejiga, lo cual contradijeron los otros gravísimos médicos, y viendo la disensión, con alguna sospecha quise asistir al abrirle, y le hallamos en la vejiga una llaga sórdida y negra y maliciosa, la cual habíamos confesado tener el Licenciado Ruy García y yo, y no piedra, porque por los excrementos se dejaba entender claro; y pasando adelante, el riñón derecho sanísimo, pero el izquierdo tenía un cancro del tamaño de una gran yema de huevo durísimo, cosa bien olvidada de todos. Tenía el pulmón dañado, casi todo estiomenado y perdido, sin haber señal en todo el proceso en la respiración, porque siempre estuvo libre, sin dificultad en ella... pasando, pues, más adelante hallamos una piedra pequeña en el hígado, del tamaño de una haba, negra como pez, y en la hiel, dentro, le hallamos diez piedras negras, con algunas vetas amarillas muy pequeñas, lo cual nos dio evidentísimo testimonio, que ni el lugar, ni la materia las había de hacer negras...". La segunda de las "observationes" con autopsia digna de ser reproducida expone un caso de "carnosidad en la vía de la orina": "El príncipe Ruigómez, de la excelente familia de los Silvas, de Portugal, camarero del cristianísimo rey Felipe II de España, hijo del invictísimo Carlos V, emperador de Alemania, padecía este mal, y mandó llamarme, al cual visité, y de la relación que me dio, entendí que padecía carnosidad, pero para mayor satisfacción quise tentarle con la candelilla, y hallé la vía de la urina tan llena de carnosidades, que le mostré la necesidad que tenía de curarse, porque, si no se curaba, podría algún día, queriendo, no poder. El cual me dijo luego lo quería hacer, mostrando gran voluntad en curarse, y como le vi determinado, me pareció que yo, recién venido a la Corte, y a un hombre tan principal, puesto en el ojo de toda España, y aún de todo el mundo, que no sería bien atreverme a curarle sin consulta de los que curaban, siendo tan doctos y célebres médicos. Le dije los avisase para otro día, para que el mal se consultase, y consultando, se aplicase el remedio que a tal pasión convenía, haciendo yo esto para mayor descargo, por ser príncipe tan grave y, pareciéndole bien lo que yo le avisaba y acerca deste mal con tantas veras le aconsejaba, me dijo que era bien y que a otro día volviese a tal hora, para juntarme con los médicos, y así concertado, me volví a la hora concertada, y hallé solos al príncipe y a la princesa con determinación y medrosos, porque le habían los médicos amenazado gran peligro en el uso de la

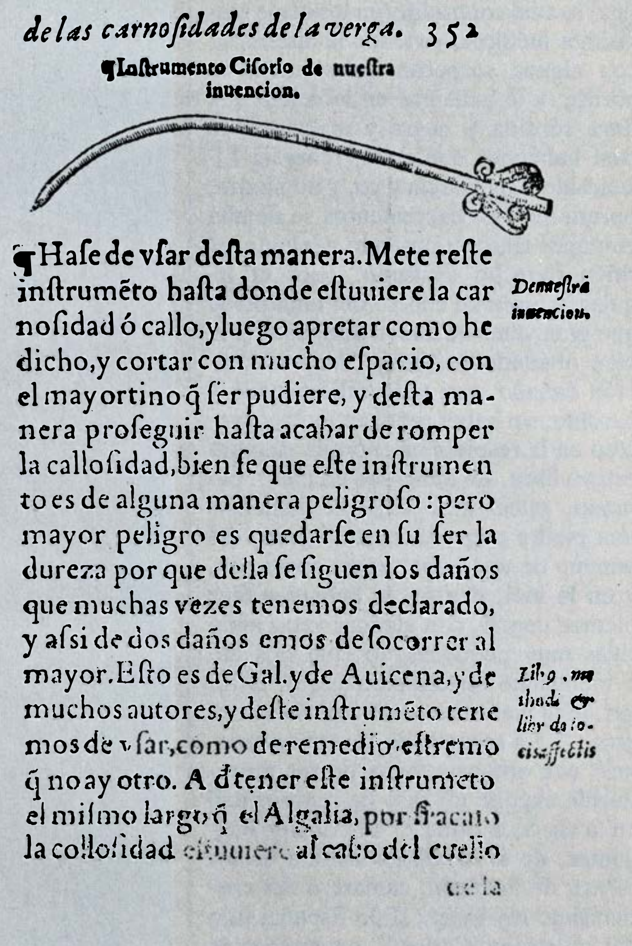

de enfermedades de vexiga. 257

Ciſoria tenaza.

ESTA tenaza, ſe tiene de entrar cerrada, y dẽtro de la capacidad de la vexiga abrilla, y trauar de la piedra y aſilla, y poco apoco yrla cortando y deshaziendola, aunque eſto tẽgo por mucho peligro, pero en caſo q̃ la piedra ſe deſpedaçe, ſe ha de procurar no quede pedaço alguno dẽtro de la vexiga ſin ſacarſe, por q̃ ſeria incõuiniẽte grãde, y eſtar la paſsion tã aparejada para aumẽtarſe como antes. Eſta es dotrina de Cornelio Celſo, y anſi miſmo es de Galeno, y de Auicena, y la razon en que todos eſtos autores graues ſe

Quãdo la piedra ſe quebrare no ã de que dar pedaço dentro.

Lib. 5. capit. 26. Lib de lapide veſica. Li. & capit. citato


de las carnoſidades de la verga. 352

¶ Inſtrumento Ciſorio de nueſtra inuencion.

¶ Haſe de vſar deſta manera. Mete reſte inſtrumẽto haſta donde eſtuuiere la carnoſidad ó callo, y luego apretar como he dicho, y cortar con mucho eſpacio, con el mayor tino q̃ ſer pudiere, y deſta manera proſeguir haſta acabar de romper la calloſidad, bien ſe que eſte inſtrumento es de alguna manera peligroſo: pero mayor peligro es quedarſe en ſu ſer la dureza por que della ſe ſiguen los daños que muchas vezes tenemos declarado, y aſsi de dos daños emos de ſocorrer al mayor. Eſto es de Gal. y de Auicena, y de muchos autores, y deſte inſtrumẽto tenemos de vſar, como de remedio eſtremo q̃ no ay otro. A de tener eſte inſtrumẽto el miſmo largo q̃ el Algalia, por ſi acaſo la calloſidad eſtuuiere al cabo del cuello de la

Demõſtrá inuencion.

Lib. 9. methodi & liber de locis affectis

Páginas del Tratado *de Francisco Díaz en las que aparecen la "cisoria tenaza" destinada a asir y deshacer los cálculos vesicales y el "instrumento cisorio para cortar las carnosidades de la verga". Con este último instrumento, el cirujano castellano inició la técnica de la uretrotomía interna para el tratamiento de las estrecheces uretrales*

candelilla, y diciéndole que no tenía carnosidad. Le dejaron tan persuadido con el miedo, que me dijo que no era su voluntad curarse... Fue, pues, pasando el tiempo y creciendo el daño, de manera que pasaron diez años, después que atormentado y engañado pasó el triste señor, hasta que se puso en tanto aprieto que se le suprimió la urina, de manera que no tuvo orden de urinar hasta el séptimo día... que fue la candelilla, urinó gran cantidad, que si fuera al principio de la enfermedad (digo este insulto de la supresión), pudiera ser tener algún remedio; pero como la urina estuvo tantos días detenida, introdujo en todo el cuerpo tan mala calidad, que luego le dio calentura grave y molestos accidentes, hasta que murió... Estando las cosas en este punto, se determinó de abrir el cuerpo, porque le habían de llevar a su villa de Pastrana, de lo cual recibí mucho gusto, sólo por desengañarme, o a los médicos que lo habían negado. Puestas las cosas a punto, se abrió y le hallamos que tres partes del miembro genital (digo de su canal), las dos tenía llena de carne endurecida, a manera de callo, que con el tiempo estaba como suela de zapato, que apenas la navaja podía cortarla, y el médico que lo había negado se espantó de manera que no pudo disimular, sin dar muestras de espanto, y confesar el engaño por su misma boca; y pasando a la vejiga, hallamos que tenía en ella nueve pedrezuelas, algunas como habas y menores, que está claro que fueran expelidas... pasando con la disección adelante, le hallamos los riñones hechos ceniza, que al parecer se abrasaron con la mucha inflamación, y que se deshacían en sólo tocarles con la pinza."

A la exposición de los tratamientos quirúrgicos concede Díaz tanta o mayor importancia que a la consagrada a los aspectos clínicos y patológicos. La litiasis y las "carnosidades" uretrales eran los principales problemas de la urología operatoria en este período. Díaz no solamente ofrece un análisis sistemático de las técnicas hasta entonces empleadas, sino que introduce innovaciones originales. Ideó una tenaza para extraer los cálculos vesicales por vía uretral y, sobre todo, fue el inventor de la uretrotomía anteroposterior: "Para este caso (el tratamiento de las estrecheces uretrales), andando confuso y con mucho cuidado, buscando remedio o instrumento que fuese para esto bastante y que lo pudiese hacer presto y con el menor peligro que se pudiese, y viendo que tampoco aprovechaba el plomo como los demás dichos, vine a dar en que se hiciese una como algalia, y que como la algalia está abierta por los lados, lo esté este instrumento por la punta, e ir cortando la callosidad poco a poco, para mayor seguridad... Háse de usar desta manera. Meter este instrumento hasta donde estuviere la carnosidad o callo, y luego apretar como he dicho y cortar con mucho espacio, con el mayor ritmo que ser pudiere, y desta manera proseguir hasta acabar de romper la callosidad. Bien sé que este instrumento es de alguna manera peligroso, pero mayor peligro es quedarse en su ser la dureza, porque della se siguen los daños que muchas veces tenemos declarados, y así de dos daños hemos de socorrer al mayor."

Dieta y cáncer

Ciertas recomendaciones pretenden reducir la incidencia de los cánceres relacionados con la nutrición. Se basan en datos de estudios epidemiológicos y en experimentos con animales

Leonard A. Cohen

En 1982, el Consejo Nacional norteamericano de Investigación, una rama de la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos, propuso unas directrices provisionales para limitar el riesgo de aparición del cáncer relacionado con la alimentación. Las principales recomendaciones consistían en reducir la ingesta de grasa, desde la media del mundo occidental, cifrada en el 40 por ciento de las calorías totales, hasta el 30 por ciento, consumir más fibra, más frutas y más verduras, aumentar la ingesta de hidratos de carbono complejos (fécula de harina y de patatas, por ejemplo) y disminuir el consumo de alimentos adobados, salados o ahumados, así como el de hidratos de carbono simples (verbigracia, el azúcar refinado).

Las recomendaciones han generado frecuentes disputas y mucha confusión entre el público, especialistas en dietética, organismos de la administración y responsables de la salud pública y la industria alimentaria. La razón principal de la polémica ha radicado en la falta de datos definitivos, pese a que las recomendaciones se basaban en indicios muy sugestivos. Es, pues, muy legítimo preguntarse si lo prudente es observar dichas recomendaciones o si, por el contrario, éstas deben considerarse algo prematuras y quizás infundadas.

La dieta humana ha cambiado de forma radical en la última fase de nuestra historia. Los estudios antropológicos de las dietas de las sociedades cazadoras y recolectoras que han sobrevivido hasta el siglo XX (por ejemplo, los bosquímanos del desierto de Kalahari, en el sur de Africa) brindan una perspectiva evolutiva de gran valor sobre los hábitos dietéticos modernos y sus posibles efectos perjudiciales. S. Boyd Eaton y Melvin J. Konner, de la Universidad de Emory, han analizado los datos obtenidos en el estudio de varias de esas sociedades y concluyen que la ingesta de grasa en los pueblos prehistóricos que vivieron en climas templados se aproximaba al 20 por ciento de las calorías totales —la mitad de la ingesta occidental habitual—, con una proporción de grasas insaturadas apreciablemente superior a la de grasas saturadas. Según parece, la ingesta de fibra rondaba los 45 gramos diarios, en comparación con los 15 gramos o menos de Occidente, y el consumo de ácido ascórbico cuadruplicaba el actual.

Si se admite que el hombre moderno (*Homo sapiens sapiens*) apareció por evolución hace entre 30.000 y 50.000 años, la especie habrá subsistido durante más del 90 por ciento de su historia con dicha dieta baja en grasas, alta en fibra y rica en ácido ascórbico y en calcio. Por tanto, los sistemas metabólico y digestivo del hombre moderno han evolucionado para adaptarse a patrones dietéticos muy distintos de los nuestros. La alimentación basada en la caza y en la recolección persistió (con pequeños cambios cuando se desarrolló la agricultura, hace, probablemente, unos 10.000 años) hasta hace 250 años, cuando la Revolución Industrial transformó el hábito de vida de mucha gente: la ingesta de grasa aumentó progresivamente, disminuyó la de fibra y creció el consumo de azúcar refinado, a la vez que se reducía el de hidratos de carbono complejos.

En consecuencia, el hombre moderno está viviendo, en cierto sentido, un desfase biológico: su fisiología de la Edad de Piedra se enfrenta diariamente con una dieta del siglo XX, para la que se encuentra muy mal preparada. Se piensa que las modificaciones de la dieta, sumadas a una forma de vida más sedentaria, no sólo son responsables del aumento de la talla de las personas, sino también de la prevalencia de la obesidad, de la madurez precoz y de enfermedades crónicas como las alteraciones cardiovasculares y el cáncer (poco frecuentes incluso entre los ancianos de las sociedades occidentales de los siglos XVIII y XIX y que tampoco son comunes en las sociedades cazadoras y recolectoras de la actualidad).

La principal razón de la incertidumbre que han generado las recomendaciones del Consejo Nacional de Investigación se debe a la complejidad de los procesos cancerígenos. Dos enfoques distintos han dominado tradicionalmente las investigaciones sobre las causas del cáncer. Uno de ellos, que se ocupa de los agentes ambientales específicos, deriva de la hipótesis formulada en 1775 por Sir Percival Pott, según la cual los cánceres de escroto y de la cavidad nasal, que afectaban frecuentemente a los deshollinadores de Inglaterra, se debían a la excesiva exposición al hollín. Años más tarde se demostró experimentalmente que ciertos hidrocarburos policíclicos que se formaban durante la combustión eran, en efecto, carcinógenos en animales de laboratorio. Luego se descubriría que otras sustancias químicas, ciertos virus y los rayos X producen también cáncer en animales.

La segunda aproximación, que examina una gama más amplia de factores menos específicos, surgió del trabajo del médico italiano Bernardino Ramazzini quien, en 1700, observó que el cáncer de mama era más frecuente entre las monjas que entre las demás mujeres. Ramazzini sugirió que tal diferencia debía de ser secundaria a la distinta experiencia de ambas poblaciones en relación con el embarazo y la lactancia. Ese tipo de características como es la vida reproductora abarcan un amplio abanico de aspectos fisiológicos, de ahí que más que tratarlas como carcinógenos en el sentido convencional se les denomina factores de riesgo.

En la década de 1940, esas dos aproximaciones se reunieron en un único esquema conceptual cuando Isaac Berenblum, del Instituto Weizmann de

Ciencias, y sus colaboradores, y Roswell K. Boutwell, de la Universidad de Wisconsin en Madison, demostraron que el proceso de carcinogénesis presenta, al menos, dos estadios: el inicio y la promoción. Se acepta hoy mayoritariamente que el cáncer se desarrolla en estadios discretos, cada uno de ellos regulado independientemente en períodos diferentes y por distintos agentes. Según se cree, el inicio se desencadena por la interacción breve e irreversible entre un carcinógeno y el material genético de su tejido diana. De resultas de la reacción aparece una lesión molecular, o mutación, que puede transformar algunas células en un estado anormal, pero que no genera un tumor clínicamente apreciable a menos que actúen otro tipo de agentes, los llamados promotores.

El promotor puede favorecer la proliferación de las células anormales e instar la formación de un tumor, pero no es un mutágeno ni un carcinógeno. Además, para que ejerza un efecto biológico debe estar siempre presente; si el estímulo del promotor se interrumpe, sus efectos revierten. (No es ese el caso de los carcinógenos, y la diferencia resulta importante a la hora de considerar las estrategias preventivas.) El tiempo que transcurre entre el fenómeno iniciador y la aparición de un tumor se denomina período de latencia. En el ser humano oscila entre 10 y 20 años.

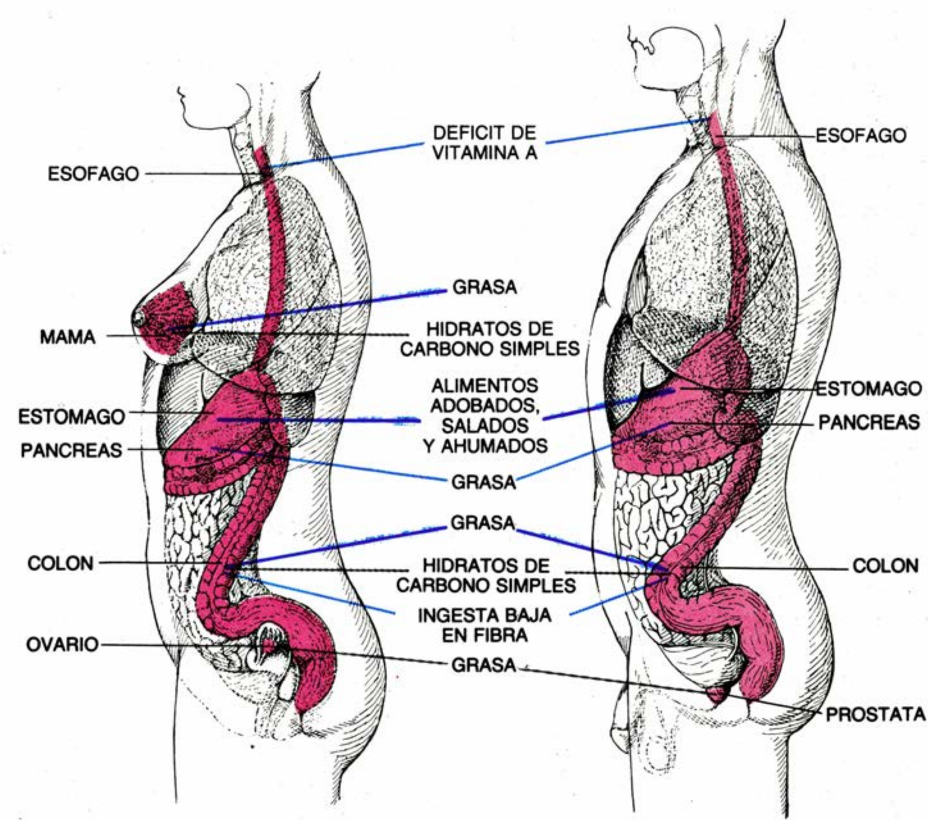
Si pudieran identificarse inequívocamente los factores iniciadores, cabría reducir la incidencia de cáncer eliminando o disminuyendo la exposición a dichos factores. Pero son muy pocos los cánceres humanos cuyos agentes causales se han identificado; entre ellos: el amianto, que provoca el mesotelioma pulmonar, o el virus de Epstein-Barr, que causa el linfoma de Burkitt. Ambos tipos son poco frecuentes. De las principales neoplasias que afectan a las poblaciones occidentales, sólo el cáncer de pulmón se ha asociado con un agente hasta cierto punto específico: la inhalación de humo de tabaco. Igual que en el caso de los restantes cánceres principales (mama, colon, próstata, páncreas, útero y ovario, que suponen un 48 por ciento de las muertes por cáncer entre las mujeres y un 28 por ciento entre los hombres), es muy poco lo que se sabe acerca de los agentes iniciadores.

En cualquier caso, la identificación y eliminación de las sustancias químicas iniciadoras, que se encuentran en el ambiente presumiblemente a bajas concentraciones, no constituye el mejor medio para impedir la aparición de los cánceres habituales. Más eficaz sería determinar qué elementos ambientales provocan tales cánceres y reducir o eliminar la exposición a ellos; o bien la vía complementaria: localizar los elementos ambientales que actúan como antipromotores y aumentar la exposición a los mismos. De eliminarse o modificarse un agente promotor durante el prolongado período de latencia, la lesión se mantendrá para siempre en esa fase o progresará hacia la fase de tumor con un ritmo mucho más lento de lo que lo haría normalmente.

En la actualidad se consideran promotores o antipromotores de diversos tumores varios elementos de la dieta. La grasa alimentaria constituye el promotor mejor definido. Entre los antipromotores posibles merecen citarse la fibra, las vitaminas A, C y E, el oligoelemento selenio y ciertos componentes del brécol, la col y la coliflor, es decir, aquellos vegetales que, por pertenecer a la familia de las Crucíferas, se denominan crucíferos. Las pruebas aportadas por estudios clínicos y experimentos de laboratorio sugieren que algunos de los componentes de esas hortalizas podrían actuar en más de una ocasión a lo largo de la secuencia carcinógena, influyendo sobre las enzimas que detoxifican los carcinógenos iniciadores y actuando también como antipromotores. Walter Troll, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Nueva York, ha investigado otro tipo de posibles antipromotores dietéticos. Se trata de inhibidores de las proteasas presentes en las judías y las semillas vegetales: contrarrestan los efectos de las enzimas que digieren proteínas y que, posiblemente, ayudan al tumor en su invasión de los tejidos adyacentes.

Dos son las principales fuentes de datos que sugieren la posible influencia de factores dietéticos en la aparición del cáncer: los estudios epidemiológicos y los experimentos de laboratorio con roedores. Los primeros pueden llevarse a cabo considerando la población entera de un país o entre grupos de individuos.

La comparación de las tasas de mortalidad por cáncer entre las poblaciones de distintos países ha proporcionado claves fundamentales sobre las causas que lo provocan. Una de las comparaciones más ilustrativas es la de los Estados Unidos con Japón. Ambas naciones presentan cotas similares de industrialización y de nivel educativo, un ré-



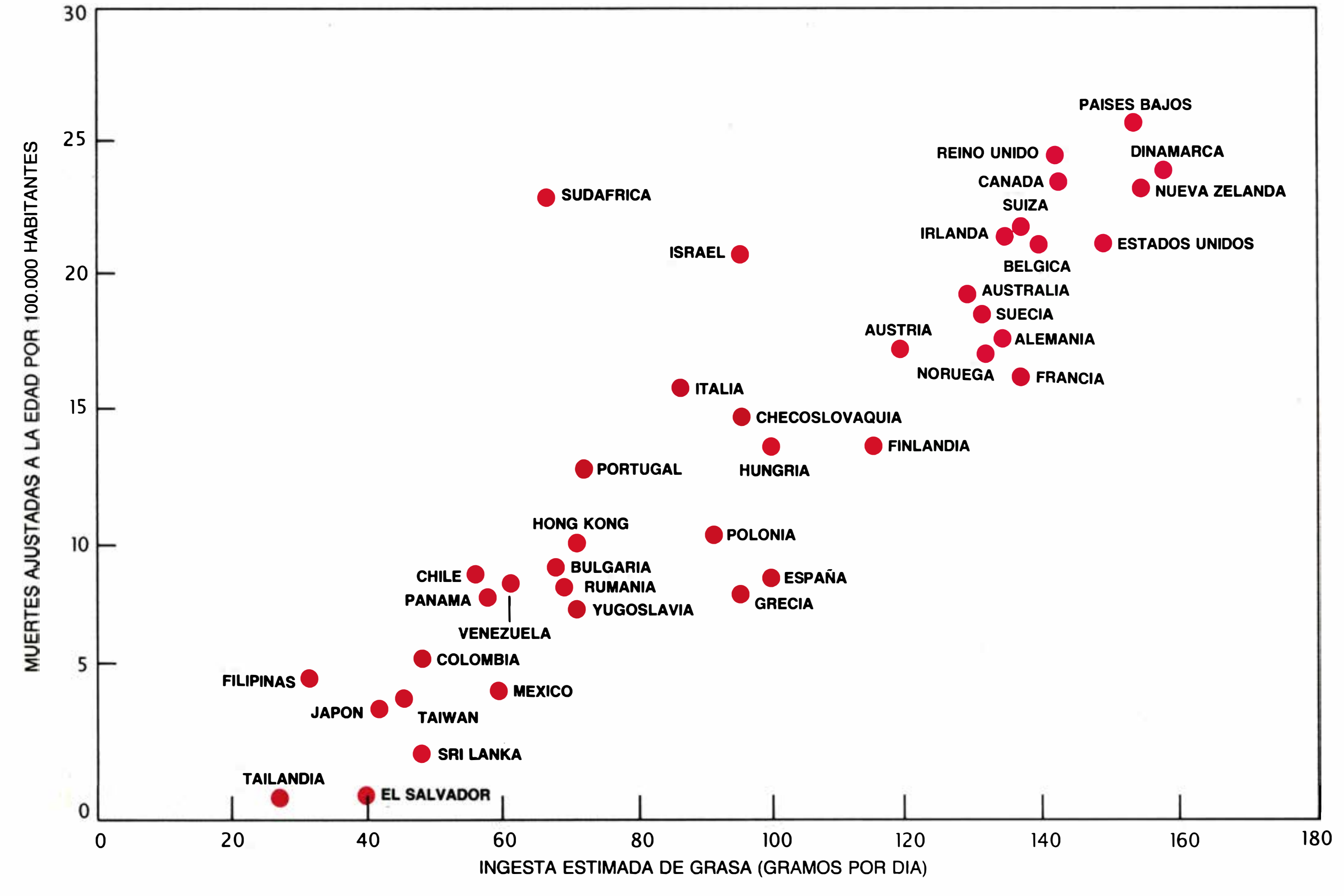
1. COMPONENTES DE LA DIETA más o menos estrechamente relacionados con el riesgo de cáncer, según datos epidemiológicos y los resultados de experimentos realizados con roedores. Las reacciones más claras se representan en azul oscuro, las de menos consistencia en azul claro y, las más débiles, en color gris.

gimen sanitario elevado y estadísticas vitales fiables. Sorprendentemente, y pese a que las tasas generales de cáncer son parecidas, ambos presentan imágenes especulares cuando se comparan tipos específicos de cáncer. Por ejemplo, abundan en los Estados Unidos las neoplasias de mama, colon y próstata, que en Japón escasean. Y a la inversa: el cáncer de estómago es común en Japón, pero poco frecuente en los Estados Unidos. ¿Se dan en mayor grado en los Estados Unidos los factores ambientales que favorecen la aparición de los cánceres de mama, de colon y de próstata, o predominan en Japón los factores que protegen contra tales tumores?

Cabría pensar que las diferencias estriban en las peculiaridades genéticas de cada país, pero esa hipótesis la han invalidado los estudios realizados sobre los emigrantes de una nación en otra; demuestran éstos que las variaciones geográficas mundiales de las tasas de cánceres organoespecíficos obedecen a factores ambientales, no a los genéticos. En este sentido, al cabo de dos generaciones, los inmigrantes japonenes afincados en Hawai o en California presentaban tasas de cáncer de mama cercanas a las de la población blanca de Hawai y significativamente más altas que las de la población nativa japonesa. Y a la inversa, la incidencia de cáncer gástrico era notablemente menor entre los japoneses hawaianos que entre los ciudadanos del Japón. También se ha apreciado un aumento de las tasas de cáncer de mama en las poblaciones llegadas a Estados Unidos procedentes de Polonia, donde el riesgo es bajo.

Tales variaciones obligan a plantearse la posibilidad de que las diferencias de dieta constituyan un factor de peso. Así lo sugirió, hace más de cincuenta años, el epidemiólogo inglés Percy Stocks, quien asoció las diferencias entre las tasas de cáncer de varias regiones de Inglaterra con el consumo de determinados alimentos. En la década de 1950, Ernest L. Wynder, de la norteamericana Fundación de la Salud, concluyó que la enorme disparidad entre las tasas de cáncer de mama japonesas y estadounidenses no podían explicarse en función de factores de riesgo conocidos, como la historia familiar o las características reproductoras; propuso que el determinante principal debía ser un factor ambiental, como la dieta. En los años sesenta, Kenneth K. Carrol, de la Universidad de Ontario Occidental, publicó una serie de comparaciones geográficas que demostraban la existencia de una estrecha correlación entre la ingesta de grasa alimentaria y la mortalidad por cáncer de mama en 39 países. En el caso de los cánceres de colon y de próstata se advirtieron correlaciones similares, si bien más débiles.

El análisis de las tendencias, a largo plazo, de la incidencia y la mortalidad por cáncer habría de brindar una nueva clave epidemiológica. Los datos revelan que, en un mismo país, las tasas de mortalidad por un cáncer particular suelen oscilar con el tiempo. Tales cambios podrían relacionarse con variaciones ambientales generales, en especial con hábitos dietéticos de la población. Así, en los países en vías de desarrollo, hasta el 80 por ciento de las calorías totales procede del consumo de cereales y grano, que están compuestos por hidratos de carbono complejos. Con la industrialización y el desarrollo económico, la ingesta calórica se inclina hacia las grasas derivadas de la carne y del aceite vegetal. También aumenta el consumo de azúcar (un hidrato de carbono simple). Estamos asistiendo, hoy mismo, a esos cambios



2. INTENSA CORRELACION LINEAL que se advierte al representar las muertes causadas por cáncer de mama en función de la ingesta de grasa. (Esta se obtuvo dividiendo el consumo total de grasa en un país por la población; no se tuvo en cuenta el desperdicio ni el consumo por parte de animales.)

en muchos países: Islandia, Italia, Grecia y Japón. Conforme se afianzan esas inclinaciones dietéticas, se observa un aumento en las tasas de cáncer de mama y de colon (y, en determinadas zonas, de próstata).

Esos mismos cambios se han producido en los Estados Unidos. Así, desde 1900, la ingesta de grasas animales y vegetales ha aumentado en un 40 por ciento, a la vez que se reducía en un 60 por ciento el consumo de patatas y, en un 50 por ciento, el de harina. Desde 1930, la incidencia de cánceres de mama, de colon y de próstata ha crecido paulatinamente. Por el contrario, han caído de forma brusca las muertes por cáncer de estómago. Tal descenso se ha atribuido a la sustitución de los procesos de salado, adobado y ahumado de los alimentos en favor de su conservación por refrigeración.

También los estudios epidemiológicos sobre individuos han proporcionado pruebas que relacionan la dieta con el cáncer. En los estudios retrospectivos se comparan enfermos de cáncer con población sana. Elaborando una historia dietética detallada de cada uno de ellos, se determina si en etapas anteriores de su vida los afectados diferían, de los sujetos control, en su alimentación. Pero los resultados pueden pecar de cierta incoherencia, pues la gente no siempre recuerda bien dietas del pasado y sus informes, subjetivos, están muy condicionados por la práctica dietética que sigan en el momento de elaborarlos.

En consecuencia, hay que cuestionarse hasta qué punto los datos epidemiológicos evidencian un efecto potenciador del cáncer en el caso de la grasa alimentaria y un efecto inhibidor en el de la fibra dietética, las vitaminas A, C y E y el selenio. (Las pruebas en relación con los componentes de los vegetales crucíferos proceden en su mayoría de experimentos realizados con animales y no de estudios epidemiológicos.) En la mayoría de esas sustancias, las pruebas resultan limitadas. Se han llevado a cabo muchos estudios epidemiológicos de distinta índole, pero ninguno de ellos satisface plenamente los criterios que aplican los epidemiólogos para inferir las causas a partir de asociaciones estadísticas.

La relación entre la grasa alimentaria y el cáncer de mama es la que más se ajusta a esos criterios. La asociación entre la ingesta de grasa y el cáncer de colon, si bien más débil, es significativa. La relación entre la grasa alimentaria y los cánceres de próstata y de ovario sólo resulta demostrable en el nivel de la población a escala nacional.

Hace unos quince años, el epidemiólogo inglés Denis P. Burkitt y otros sugirieron que la fibra de la dieta —la parte de la célula vegetal que no se digiere en el intestino delgado humano— ejercía un efecto protector frente al cáncer de intestino grueso. Burkitt, que trabajaba como médico militar en Africa, propuso que la elevada ingesta de fibra en ciertas poblaciones las protegía ante diversas enfermedades del tracto digestivo: apendicitis, diverticulitis y cáncer de colon. Sin embargo, los intentos por comprobar esa hipótesis mediante comparaciones entre países se han visto obstaculizados por la falta de acuerdo general acerca de la mejor manera de cuantificar la ingesta de fibra. En los primeros estudios se consideraban los grupos de alimentos que contenían cantidades elevadas de fibra —cereales, granos, frutas y verduras— en lugar de los propios nutrientes. Utilizando esos grupos como indicadores de la ingesta de fibra se observó que la mortalidad por cáncer de colon presentaba una relación inversa con el consumo de cereales y granos, pero no con el de frutas y verduras.

En 1978, Alison A. Paul y D. A. T. Southgate, del Consejo de Investigación Agrícola y Alimentaria del Instituto de Investigación Alimentaria de Norwich, Inglaterra, publicaron las cantidades químicamente definidas de fibra presentes en diversos alimentos, dotando así a los epidemiólogos de mejores herramientas para determinar la ingesta de fibra y su relación con el cáncer de colon. De aquellos estudios se deduce que "fibra" es un término general bajo el cual se designan sustancias tan distintas, química y fisiológicamente, como la celulosa, las gomas, las pectinas y las ligninas. Como ejemplo ilustrativo, Sheila A. Bingham, de la Universidad de Cambridge, y sus colaboradores demostraron que la mortalidad por cáncer de intestino grueso guardaba una relación inversa con la ingesta de cierto tipo de fibra, los pentosanos, pero no con la ingesta total de fibra.

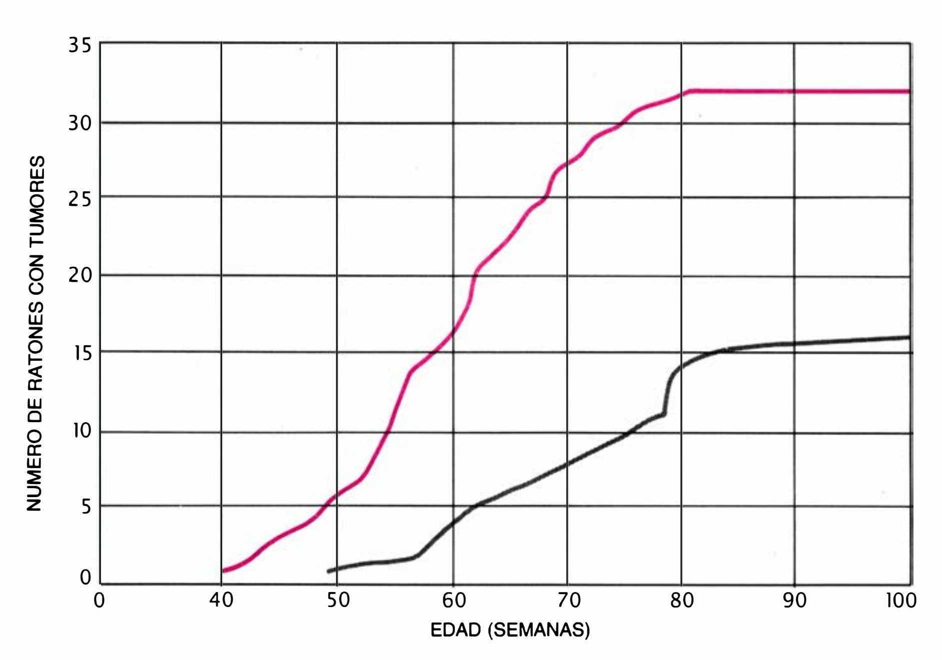
Las pruebas epidemiológicas sobre los efectos anticancerígenos de la vitamina A (o de su precursor en la dieta, el beta-caroteno) proceden casi exclusivamente de la comparación de enfermos de cáncer con poblaciones sanas. Los hallazgos se refieren principalmente al cáncer de pulmón; en menor cuantía, también incluyen a los cánceres de colon, de vejiga, de esófago y de boca. No hay pruebas de que otras vitaminas presenten un efecto protector, si exceptuamos una posible asociación de la ingesta de vitaminas C y E con el descenso de las tasas de cáncer gástrico.

Raymond J. Shamberger, de la Fundación Clínica de Cleveland, sugirió el posible efecto anticancerígeno del selenio. Se basaba en el hallazgo de que el nivel de selenio en la tierra, en los cultivos y en la sangre se relacionaban inversamente con el riesgo de cáncer de mama y de colon en diversas ciudades y zonas de los Estados Unidos. Otros estudios de alcance internacional pusieron de manifiesto una relación similar. Sin embargo, la intensidad y coherencia de esas asociaciones resulta en algunos casos algo débil. Por ejemplo, la ingesta de selenio se encuentra en Nueva Zelanda entre las más bajas (50 microgramos diarios) y la mortalidad por cáncer de mama es allí de 30 por cada 100.000 habitantes, mientras que en los Estados Unidos la ingesta de selenio es de unos 120 microgramos por día y la mortalidad por cáncer de mama resulta casi idéntica (27 por cada 100.000 habitantes). Esas contradicciones, sin descartar un posible efecto del selenio, abogan por el predominio de otros factores.

Como se demuestra en los expuesto hasta ahora, los epidemiólogos se fundan principalmente en los hechos ocurridos en la naturaleza y buscan sus posibles causas. Nuestros métodos, bastante toscos, para valorar el consumo de alimentos, sobre todo los ingeridos por el hombre en el pasado, sólo le permiten al epidemiólogo demostrar la existencia de correlaciones o asociaciones de cierta coherencia, como la que se da entre la grasa alimentaria y el cáncer de mama. Sin embargo, las asociaciones estadísticas sólo presuponen la causalidad; no la prueban.

Por su lado, el científico experimental avanza de las causas hacia los resultados; con ello tenemos la segunda fuente principal de datos sobre la relación entre dieta y cáncer. Este proceder presenta, sin embargo, un inconveniente: los resultados de los experimentos de laboratorio realizados con roedores deben interpretarse con precaución, especialmente cuando se pretende extrapolar los hallazgos y ponderar los efectos sobre el ser humano.

Ensayos que se remontan 60 años atrás demostraron que podía modularse la aparición de cáncer en ratones de laboratorio por medio de la alimentación. También en este caso, la correlación más intensa se da entre la grasa alimentaria y el cáncer mamario (de-



3. CLASICO EXPERIMENTO con una hembra de ratón de laboratorio, realizado por Albert Tannenbaum, del Hospital Michael Reese de Chicago, en el que se demostró una estrecha relación entre la dieta rica en grasas y la incidencia acumulativa de tumores mamarios espontáneos. El aceite de semilla de algodón hidrogenado constituía el 12 por ciento de la dieta rica en grasas (*color*) y el 3 por ciento de la dieta control.

nominación que no es exclusiva de las mujeres). Albert Tannenbaum, del Hospital Michael Reese de Chicago, demostró tal asociación en la década de 1920. A finales de los 60, Carroll puso de manifiesto, estudiando un tumor mamario inducido químicamente en el que podía distinguir el inicio y la promoción, que la grasa actuaba como promotor. Desde entonces, se ha venido comprobando que la grasa ejerce un efecto promotor del cáncer en tumores mamarios inducidos por productos químicos, por rayos X y por virus. Se ha observado, asimismo, que una dieta rica en grasas fomenta el desarrollo de cánceres de colon y de páncreas inducidos experimentalmente.

Los estudios con animales han demostrado también que el tipo y la cantidad de grasa alimentaria condicionan el desarrollo de tumores mamarios, de colon y de páncreas. Las dietas ricas en grasa y en determinados ácidos grasos promueven la formación de tumores, mientras que dietas similares con una proporción elevada de otros ácidos grasos no presentan tal efecto. Al parecer, la diferencia viene determinada por la estructura química de los ácidos grasos. Las dietas ricas en grasa y en ácido linoleico (presente en el maíz, la flor del azafrán, el girasol y otros aceites vegetales comunes) actúan como promotores; dietas similares ricas en ácido oleico (del pescado azul y de los mamíferos marinos) no actúan como promotores.

Estos hallazgos de la experimentación con animales explicarían algunos enigmas epidemiológicos, como la baja incidencia de cánceres de mama y de colon entre los esquimales de Groenlandia. Esa población subsiste con una dieta extraordinariamente alta en grasa (un 60 por ciento de las calorías totales), que procede casi por completo de pescado y de mamíferos marinos. De igual forma, la tasa moderada de cáncer de mama en Grecia y España, países donde la ingesta de grasa es bastante elevada (un 32 por ciento de las calorías), respondería a que en las dietas mediterráneas el aceite de oliva constituye una fuente principal de lípidos.

¿De qué forma promueve la grasa alimentaria el desarrollo de los cánceres de mama, de colon y de páncreas? Ante la sensibilidad de la glándula mamaria a las hormonas, se sugirió en un principio un posible efecto indirecto, a través del sistema endocrino. Podrían mediar dicho efecto un proceso central en el dominio de la glándula hipofisaria o de estructuras superiores, que regulan la secreción de prolactina u hormonas afines, o bien un proceso periférico, en el nivel del órgano efector, donde se afectaría la capacidad de unión de ciertos receptores hormonales.

Otra hipótesis implicaba a las prostaglandinas, un tipo de lípidos biológicamente activos que sintetiza el organismo a partir de los ácidos grasos (principalmente del ácido linoleico) ingeridos con los alimentos. A través de una breve sucesión de pasos metabólicos, el ácido se convierte en las poderosas prostaglandinas, similares a hormonas, que intervienen en la regulación de la contracción del músculo liso, las reacciones de inflamación, la coagulación de la sangre y la respuesta inmunitaria, entre otras funciones.

Los tumores mamarios y los cánceres de mama sintetizan cantidades importantes de prostaglandinas, que podrían suprimir la respuesta inmunitaria del huésped. La dieta puede alterar su producción, lo que induce a pensar que, proporcionando una cuantía abundante de grasas, podría modularse la cantidad y el sentido de la síntesis de prostaglandinas. Un mecanismo tal no sólo explicaría por qué se requiere cierta cantidad de ácido linoleico en las dietas experimentales para conseguir el efecto propio de las dietas ricas en grasas, sino que justificaría también el papel inhibidor de los aceites marinos, ya que éstos bloquean la conversión del ácido linoleico en prostaglandinas.

Entre las hipótesis que relacionan las dietas ricas en grasas con el cáncer de colon, la que goza de mayor predicamento se basa en el hallazgo de que una ingesta elevada de grasas insta el aumento de la secreción de ácidos biliares (que intervienen en la digestión de las grasas) y altera la población bacteriana del intestino grueso, incrementándose la conversión de los ácidos biliares primarios en secundarios. Según se cree, los ácidos biliares secundarios actúan como promotores de lesiones ya presentes en el intestino grueso.

Los resultados obtenidos en experimentos con roedores han contribuido a profundizar en el conocimiento de los agentes anticancerosos. Se ha demostrado en diversos estudios que la administración de vitamina A o de sus análogos (que se integran en el grupo general de los retinoides) inhibe el desarrollo del cáncer inducido experimentalmente en la piel, el tracto respiratorio, la glándula mamaria y la vejiga. Sin embargo, la cantidad de retinoides necesaria para que aparezca algún efecto es unas 20 veces la recomendada diariamente para la vitamina. Se ha informado de la aparición de efectos colaterales, así la reducción del aumento de peso, mayor fragilidad ósea y disfunción hepática resultante de tan altas dosis. Por otra parte, se ha demostrado que el selenio reduce la frecuencia de los tumores mamario y de colon inducidos químicamente en el ratón, pero sólo a canti-

dades entre 30 y 40 veces superiores a las recomendadas para la ingesta diaria.

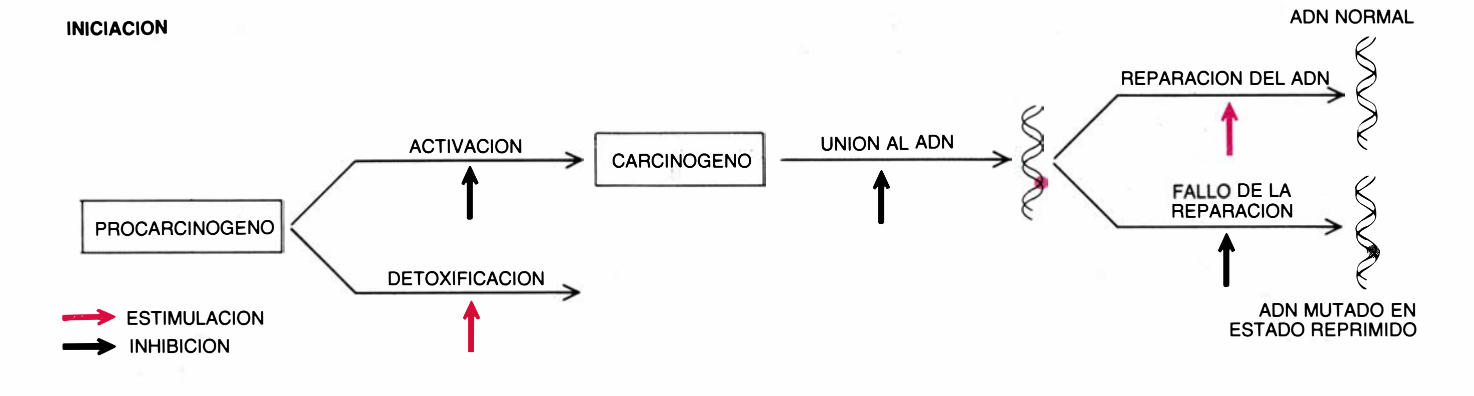
Los resultados de laboratorio obtenidos en el caso de los retinoides y del selenio como suplementos de la alimentación ilustran tres aspectos significativos. Primero, se deben administrar dosis suprafisiológicas para conseguir los efectos deseados. Segundo, hay una frontera muy tenue entre la dosis terapéutica y la dosis perjudicial. Tercero, ningún compuesto puede impedir por completo el desarrollo de un tumor.

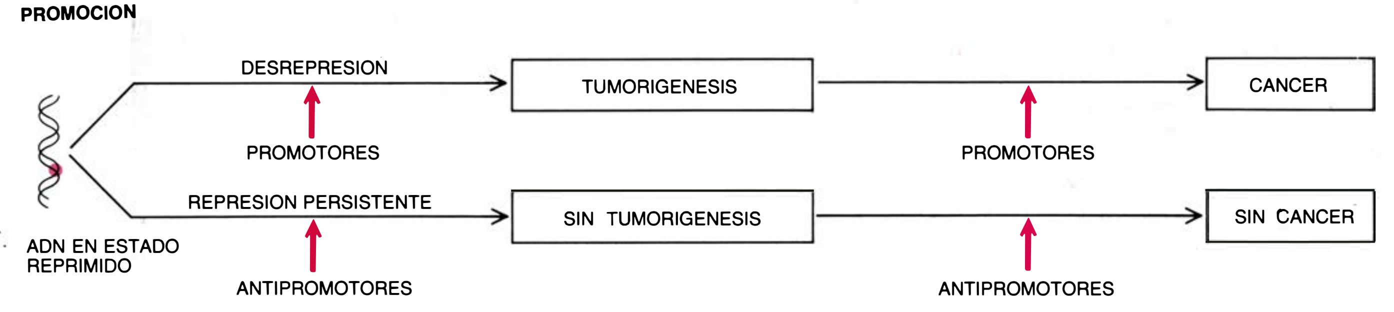
En estudios con animales se ha demostrado que un aumento de la fibra de la dieta desde el 5 por ciento habitual hasta un 15 por ciento o más reduce la frecuencia del cáncer inducido químicamente en el colon de ratones. Sin embargo, los datos no resultan del todo coherentes y dependen del tipo específico de fibra valorado. Por ejemplo, el salvado de trigo disminuye la incidencia de tumores de colon, mientras que la pectina de la manzana, la alfalfa y el salvado de avena no presentan ningún efecto o incluso estimulan la formación de cánceres de colon, según las condiciones del experimento.

Se han propuesto distintos mecanismos para explicar los efectos protectores que la fibra evidencia ante el cáncer de colon. Los trabajos de O. M. Jensen, del Registro de Cáncer danés, y de Bandaru S. Reddy, de la norteamericana Fundación de la Salud, indican que las poblaciones con bajo riesgo de cáncer de colon excretan una cantidad de ácidos biliares menor que las poblaciones de alto riesgo, así como que los grupos de bajo riesgo consumen dietas más ricas en fibra. La disminución del contenido de ácidos biliares podría deberse al aumento del volumen fecal que produce la fibra, que reduce la cantidad de ácidos biliares por unidad de volumen, o al estímulo, por parte de la fibra, de los mecanismos que eliminan ácidos biliares del intestino grueso y los introducen en la circulación. El aumento de la ingesta de fibra acorta también el intervalo entre la comida y la excreción, con lo que los posibles mutágenos contenidos en las heces disponen de menos tiempo para actuar sobre el colon.

Los estudios de laboratorio apuntan hacia un efecto anticanceroso de las flavonas, los indoles y los isotiocianatos (compuestos no nutritivos que forman el grupo de los constituyentes vegetales secundarios), derivados de las hortalizas crucíferas. Hasta el momento, dicho efecto se ha demostrado sólo en el caso de los tumores inducidos químicamente en estómago, pulmón y glándula mamaria de roedores. Por lo que parece, esos compuestos actúan en el hospedador bloqueando la activación de agentes hidrocarbonados. (La mayoría de los carcinógenos se consumen en forma de procarcinógenos inactivos; antes de que puedan reaccionar con el ADN de las células diana deben activarlos enzimas hepáticas.)

Se han sometido a experimentación los efectos del salado, el adobado y el ahumado de los alimentos. Esos métodos de conservación crean condiciones bajo las cuales los nitratos se convierten en nitritos, muy reactivos; se ha demostrado que, *in vitro*, éstos se combinan con los sustratos apropiados para formar nitrosaminas y nitrosamidas, que son carcinógenas. Peter N. Magee, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Temple, ha realizado experimentos de laboratorio que prueban el poder carcinogénico de tales compuestos. Sidney S. Mirvish, del Instituto Eppley para la Investigación del Cáncer, de Omaha, ha observado que no se producen reacciones de nitrosa-





4. INFLUENCIA DE LOS FACTORES DIETETICOS en el inicio y la progresión de la carcinogénesis; el esquema refleja la situación actual de la ciencia. Puede iniciarse un cáncer cuando un procarcinógeno (presente en la dieta o de un origen distinto) se activa y se une al ADN, provocándole una mutación (en la que, posiblemente, se afecte un oncogén). La mutación puede o no repararse. Determinados componentes de la dieta, como las vitaminas A, C y E, indoles de las hortalizas crucíferas y el elemento traza selenio, pueden estimular (*color*) o inhibir (*negro*) los procesos de activación, unión y reparación. Una mutación no reparada puede transformar las células en un estado anormal, permaneciendo ésta reprimida —el tumor no se desarrolla y no hay progresión hacia el cáncer— salvo en presencia de promotores, como es el caso de una dieta rica en grasas. Los antipromotores, como la vitamina A, tienden a mantener la represión.

ción en presencia de ácido ascórbico (vitamina C), que bloquea la conversión de los nitratos en nitritos.

Algunos de los alimentos que consume la población en alto riesgo de padecer cáncer de estómago —por ejemplo, pescado ahumado (Japón) y habas (Colombia)— producen, según se ha comprobado, mutágenos después de la nitrosación. Esa misma población consume frutas y verduras frescas en cantidades escasas y, por tanto, toman poca vitamina C; por consiguiente, el cáncer gástrico podría resultar de la formación, en el estómago, de nitrosaminas o nitrosamidas carcinógenas a partir de los nitratos de la dieta y en ausencia de vitamina C. Sin embargo, en ningún caso se han encontrado en personas o en animales de experimentación las hipotéticas sustancias nitrosadas "naturales" a las que se les atribuye la aparición del cáncer de estómago.

Son muy limitados los datos experimentales que apoyan el supuesto de que en la dieta son preferibles los hidratos de carbono complejos a los azúcares simples. Varios informes indican que las ratas de laboratorio alimentadas con una dieta que contenía fécula administrada a continuación de la ingesta de un carcinógeno químico mostraban una incidencia significativamente menor de cáncer mamario que las ratas alimentadas con una dieta similar con dextrosa (un azúcar sencillo) en vez de fécula. Salvo que los hidratos de carbono complejos se digieren más lentamente que los azúcares simples y que, por tanto, ejercen un efecto menos pronunciado sobre las células secretoras de insulina del páncreas, poco se sabe de los mecanismos responsables de las acciones de esos tipos de hidratos de carbono en la carcinogénesis experimental.

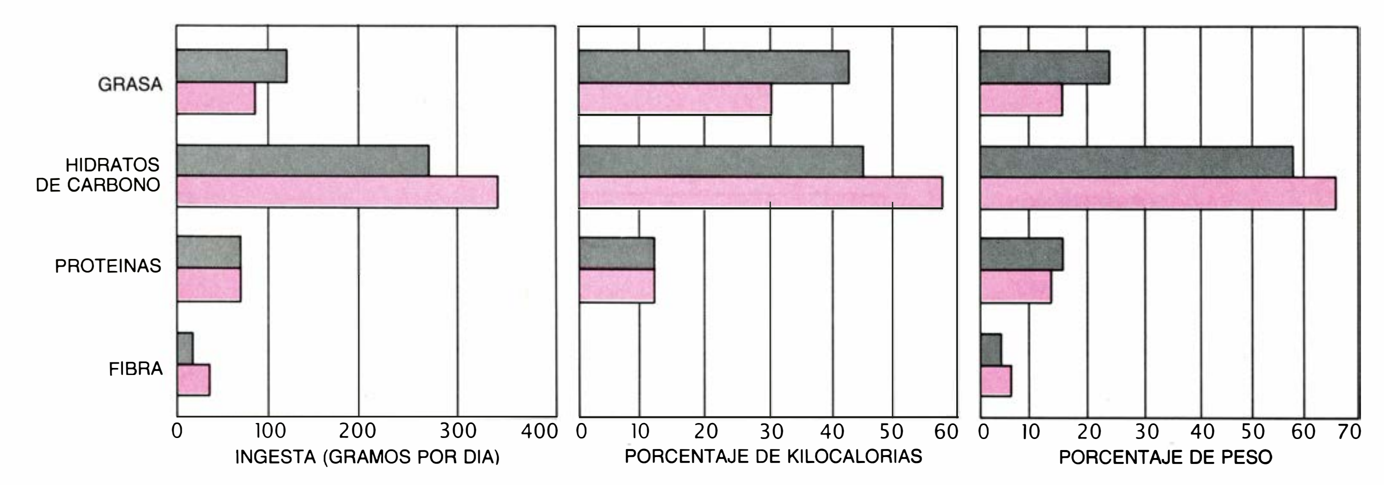
¿Qué consecuencias pueden extraerse de los datos experimentales recabados? En general, resultan coherentes con los obtenidos en los estudios epidemiológicos, especialmente en el caso de la relación entre la grasa alimentaria y el cáncer de mama. En muchos estudios con animales se demuestra que una dieta rica en grasas (40 por ciento de las calorías totales) estimula el desarrollo de tumores mamarios, mientras que una dieta con poca grasa (10 por ciento de las calorías totales) no presenta ese efecto. Lo más interesante de todo: las cantidades de grasa de las dietas experimentales ricas y pobres en grasa son, respectivamente, casi idénticas a las que se consumen en los países con población de alto riesgo, como Estados Unidos, y con bajo riesgo, como Japón. Falta por determinar si el riesgo de cáncer de mama varía gradualmente con la cantidad de grasa consumida o si existe un umbral por debajo del cual el aumento en la ingesta de grasa no supone un mayor riesgo. Los trabajos acometidos en mi laboratorio del Instituto Naylor Dana apoyan la existencia de un umbral entre el 25 y el 35 por ciento de las calorías totales.

También en los estudios sobre el cáncer de colon se utilizan dietas experimentales similares a las de las poblaciones humanas (aunque en este caso debe considerarse el efecto de la ingesta de fibra). Por el contrario, en las investigaciones sobre los retinoides y el selenio se emplean cantidades muy por encima del consumo diario recomendado. Constituidas en agentes anticancerosos potenciales, estas sustancias se acercarían más a un uso medicamentoso que a los componentes habituales de la dieta normal.

Adviértase, por último, que, con independencia del atractivo que encierren los estudios epidemiológicos o experimentales, no aportan pruebas inequívocas de que esta o aquella persona deba reducir la cantidad de grasa de que se compone su dieta, tomar más vitaminas, comer más fibra y hortalizas crucíferas, etcétera. No se ha demostrado directamente en ningún caso que la introducción de tales cambios en la dieta de un individuo inhiba la aparición del cáncer o impida la propagación de otro ya establecido.

Se podrían obtener datos definitivos experimentales con seres humanos. Con ensayos aleatorios de intervención en la dieta se podría comparar el efecto de varias dietas sobre la aparición de enfermedades en grupos distintos de personas sanas. Para tales ensayos se necesitarían decenas de miles de sujetos y seguir el cumplimiento de la dieta durante un período de 10 años por lo menos. La logística sería formidable y el coste astronómico; los resultados no podrían conocerse hasta pasados diez o veinte años.

Se ha optado por la vía alternativa de realizar ensayos clínicos con personas que presentan alto riesgo a determinados cánceres; se conocerán los resultados en cinco o diez años. En esta línea, en un estudio patrocinado por el Instituto Nacional estadounidense del Cáncer se está haciendo un seguimiento de mujeres sanas consideradas de



5. DIETA NORTEAMERICANA, que cambiaría si se siguieran las recomendaciones emitidas por el Consejo Nacional de Investigación y otras entidades. La dieta actual (*gris*) y la recomendada (*color*) se comparan en función de la cantidad de cada componente (en gramos por día) y su contribución a las kilocalorías totales y al peso de la dieta. Se trata de reducir la ingesta de los alimentos considerados capaces de iniciar o promover el cáncer y aumentar la de los que se piensa que anulan o moderan el efecto iniciador o promotor del cáncer de otros factores. Cuando se mantiene constante la ingesta total de calorías en 2400 kilocalorías, aumenta el consumo de alimentos, en peso, porque las grasas, muy calóricas, se sustituyen por hidratos de carbono, menos calóricos, y por fibra.

alto riesgo para el cáncer de mama, porque lo haya presentado anteriormente algún familiar o porque hayan padecido una patología mamaria benigna. De forma aleatoria, se les pide que mantengan su dieta habitual rica en grasas o que la cambien por otra con pocas grasas. Según se espera, incluso en un ensayo de ese tipo participarán unas 30.000 mujeres, la prueba durará unos diez años y su coste superará los 100 millones de dólares. Están en funcionamiento otros ensayos similares. Uno de ellos, a realizar en los Estados Unidos, valorará el efecto del aumento de la ingesta de fibra sobre la incidencia del cáncer de colon en sujetos con pólipos benignos de colon (un grupo de alto riesgo); otro, en Italia, estudiará el efecto de la administración suplementaria de retinoides sobre la aparición de cáncer de mama secundario en mujeres que ya han padecido un cáncer de mama.

No parece probable que los resultados de los ensayos clínicos lleguen antes de la década de 1990 o incluso más tarde. Cabe cuestionarse, pues, si es preferible ignorar los datos disponibles, indirectos y circunstanciales, que relacionan la dieta con el cáncer y no hacer recomendaciones dietéticas específicas, o si, por el contrario, se debe obrar de acuerdo con las conjeturas más fiables y proponer recomendaciones provisionales. Muchos expertos argumentan, basados en principios éticos, que las recomendaciones de salud pública deben fundarse exclusivamente en hallazgos comprobados de manera inequívoca. Otros afirman que, con más de 400.000 muertes anuales por cáncer en Estados Unidos, incluso una pequeña reducción de esa cifra salvaría muchas vidas, por lo que, en bien de la salud pública y a pesar de su carácter provisional, deben hacerse recomendaciones dietéticas encaminadas a reducir el riesgo de contraerlo.

El Consejo Nacional estadounidense de Investigación ha optado por la segunda postura, proponiendo guías dietéticas provisionales basadas en los datos epidemiológicos y experimentales disponibles. Sin duda, conforme aumenten los conocimientos en esta área, esas recomendaciones habrán de revisarse. Representan el estado actual de la ciencia en esa cuestión y constituyen el soporte de una dieta que probablemente no produzca ningún efecto perjudicial y sí bastantes posibilidades de reducir el riesgo de los principales cánceres inducidos por la alimentación.

Supernovas ricas en helio

Los modelos de ordenador sugieren que se producen cuando colapsa el núcleo de una estrella de gran masa. Estas supernovas son primas hermanas del brillante suceso del año pasado

J. Craig Wheeler y Robert P. Harkness

El reverendo Robert Evans, de Hazelbrook, de la australiana Nueva Gales del Sur, debe haberse acostumbrado a sufrir chistes de dudoso gusto sobre su "línea directa con Dios". Cuando sus deberes parroquiales le dejan algún tiempo libre, se dirige a su telescopio para explorar otras galaxias, en busca de supernovas: raras y catastróficas explosiones en las que, por algunas semanas, una estrella fulgura, destacando por encima del brillo de su galaxia anfitriona. Sea por su dedicación y persistencia, o por un especial talento para el reconocimiento de configuraciones, Evans ha compilado un historial de descubrimientos que ha entrado ya en la leyenda. De las 66 supernovas observadas entre 1983 y mediados de 1986, descubrió 10, la mayoría en galaxias bastante próximas, donde aparecen brillantes y susceptibles de estudio por parte de los astrónomos profesionales.

Los hallazgos de Evans se distinguen por algo más que por su número. Espectros precisos y digitalizados de la luz de dos de sus sucesos, junto con los modelos de ordenador de estrellas que explotan, han obligado a admitir una nueva clase de supernovas. Estos objetos celestes se han venido clasificando en dos categorías, de acuerdo con sus espectros. Se creía que cada categoría estaba asociada a una clase bien definida de explosión en un tipo específico de estrella: la explosión termonuclear de una antigua estrella enana, o el violento colapso de una abultada estrella de gran masa y rica en hidrógeno. Los descubrimientos de Evans, amén de otros sucesos afines (que coinciden en anunciar la muerte de estrellas de gran masa previamente despojadas de su hidrógeno), han puesto en entredicho el sistema de clasificación espectral y sugieren que uno o ambos mecanismos de explosión pueden dar lugar a cualquier clase del espectro.

El 23 de febrero del año pasado fue un día muy nuboso en Nueva Gales del Sur, lo que privó al clérigo de la oportunidad de observar SN 1987A, la supernova más luminosa desde los tiempos de Kepler y un importante punto focal para la investigación de supernovas en los próximos decenios. La explosión apareció en una galaxia próxima e irregular, conocida como la Gran Nube de Magallanes; y el privilegio de su observación les cupo a Ian Shelton, de la Universidad de Toronto y astrónomo del Observatorio Interamericano de Las Campanas en Chile, Oscar Duhalde, asistente nocturno en el mismo centro, e independientemente a Albert Jones, otro aficionado neozelandés. Pero es justo reconocer que el estudio de los sucesos de Evans había preparado el camino para SN 1987A. La explosión evidenció rasgos estrechamente relacionados con los de la nueva clase de supernovas y muchísimos otros insólitos.

El esquema de clasificación mantenía su vigencia desde el decenio de 1930, cuando Fritz Zwicky, del Instituto de Tecnología de California, inició el catálogo de supernovas. Las primeras tres docenas de su recuento pertenecían a la misma clase. Su espectro, aunque incomprensible y diferente del de cualquier otra estrella, se parecía de un suceso a otro. Su curva de luminosidad, que representa la variación del brillo con el tiempo, era también típica: el brillo alcanzaba un máximo al par de semanas aproximadamente, decrecía con brusquedad a lo largo de otros quince días y remitía luego exponencialmente, con una semivida de unos 50 días.

Zwicky halló una segunda clase de sucesos. Intrínsecamente dotados de menor brillo, lo que explicaba quizá su tardío descubrimiento, variaban en su curva de luminosidad. A diferencia del primer grupo, estos sucesos mostraban espectros con una característica reconocible: líneas espectrales del hidrógeno. Las líneas representan longitudes de onda a las cuales los átomos excitados de hidrógeno emiten fotones cuando experimentan transiciones entre estados de energía. Rudolph Minkowski, que trabajaba con Zwicky, distinguió las supernovas que mostraban su espectro típico, aunque ininteligible, y las que aportaban una prueba clara de hidrógeno en el material; las denominó Tipo I y Tipo II, respectivamente.

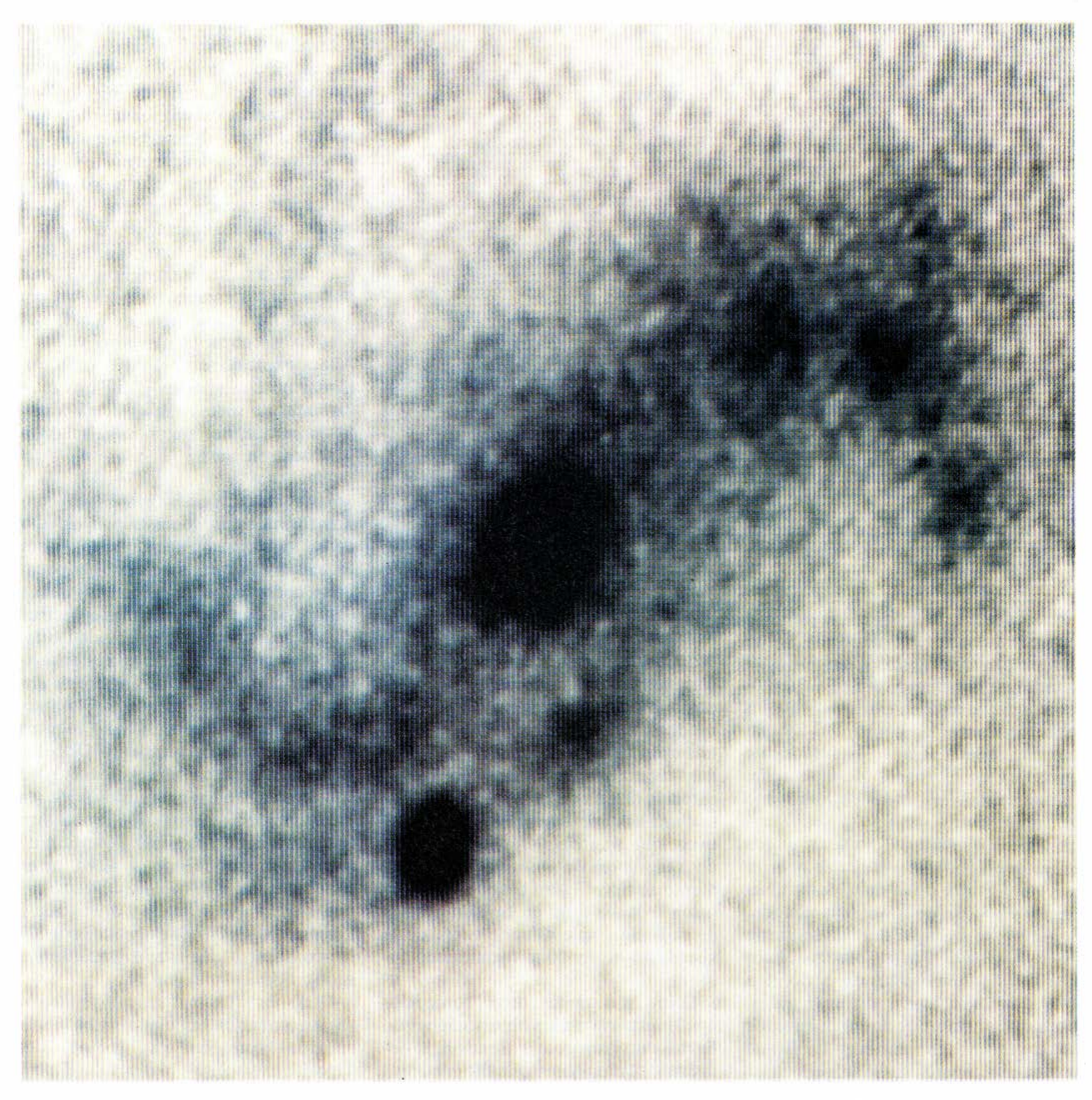
Los avances teóricos apuntaban a dos mecanismos distintos de explosión, descritos por Fred Hoyle, de la Universidad de Cambridge, y William A. Fowler, del Caltech (Instituto de Tecnología de California), en el decenio de 1950. El mecanismo para las supernovas del Tipo I sería el de una bomba del tamaño de una estrella, impulsada por una reacción termonuclear descontrolada. Se cree que el marco del suceso es una estrella enana blanca: un resto compacto y antiguo de una estrella progenitora, de masa no mayor que ocho veces la solar, que ha consumido la mayor parte de su hidrógeno y helio para formar elementos de masa intermedia, como oxígeno y carbono.

Una estrella compañera binaria desencadena la explosión. En estadios precoces de la evolución de la estrella, la compañera puede haber arrebatado la capa exterior de hidrógeno de la enana blanca, dejando al descubierto su denso núcleo de oxígeno y carbono. Más tarde, la enana blanca extrae materia de su compañera. La densidad y temperatura del núcleo aumentan bruscamente, y el carbono allí existente comienza a fundirse para constituir elementos más pesados, entre ellos níquel radiactivo. Un frente ardiente irrumpe hacia fuera, destruyendo por completo la estrella, pero la nube en expansión de productos expulsados brilla intensamente durante

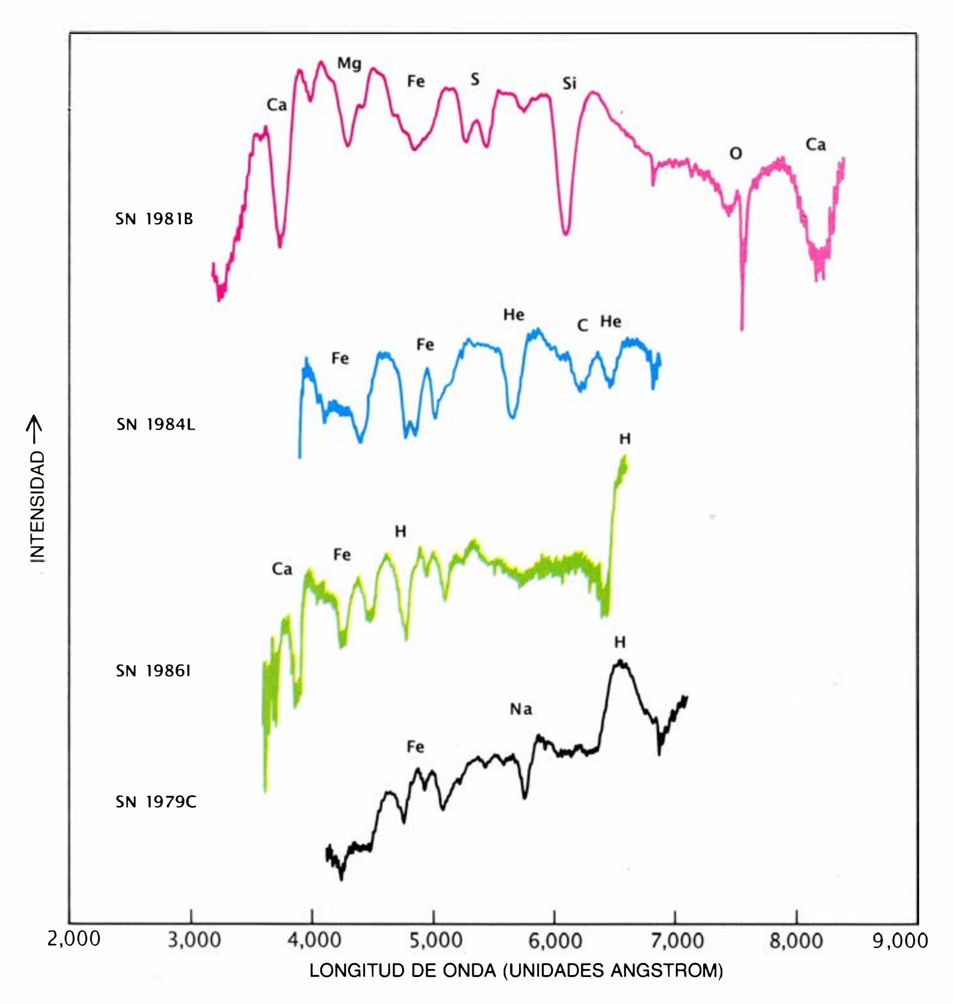
muchas semanas, mientras el níquel degenera en cobalto y después en hierro.

Las supernovas de Tipo II se producen mediante un mecanismo más exótico. El propio Zwicky había propuesto que la formación de una estrella de neutrones, una esfera de materia de densidad equiparable a la de un núcleo atómico y varios kilómetros de diámetro, podría liberar energía suficiente para desencadenar una supernova. En esencia, se trata del mecanismo todavía aceptado para los sucesos del Tipo II. En la parte central de una estrella de más de ocho masas solares, la combustión termonuclear progresa rápidamente a través de una serie de reacciones de fusión que terminan en níquel y hierro, cuyos núcleos son los más densos de todos los elementos; la fusión ulterior consumiría energía, en lugar de liberarla. Cuando termina la producción de calor en la parte central, la estrella se contrae de una manera brusca y los protones y electrones de los átomos del interior se ven obligados a juntarse. Se combinan entonces y forman neutrones, con la liberación de un neutrino por cada neutrón constituido; la contracción de la bola de neutrones se detiene e invierte su curso cuando se ha comprimido hasta densidades nucleares [véase "Así explota una supernova", por Hans A. Bethe y Gerald Brown; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, julio de 1985].

Aunque queda mucho por conocer sobre el proceso en cuestión, el colapso libera una enorme cantidad de energía. La mayor parte de ella se pierde en una brusca emisión de neutrinos, que atraviesan sin oposición las capas exterio-



1. SUPERNOVA 1983I: así se la vio fulgurar en la galaxia NGC 4051. La supernova (gruesa mancha en negro del centro de esta imagen en negativo) parece coincidir con un brazo galáctico; sugiere ello que se originó en una de las estrellas de gran masa, habituales en los brazos galácticos. El suceso se adscribió a la clase del Tipo Ib, constituido por estrellas de gran masa que explotan, merced a modelos de ordenador que mostraron que una variante del tipo de estrella involucrado en otros sucesos Tipo Ib podía también dar cuenta del espectro de esta supernova. Fotografía tomada por John F. Kielkopf, del Observatorio Moore.



2. ESPECTROS de supernovas de distintos tipos. Registran la intensidad de luz para un determinado dominio de longitud de onda. Los máximos y mínimos del espectro identifican elementos de la atmósfera de la supernova que emiten o absorben fotones para ciertas longitudes de onda. La clase SN Ia (*en rojo*) carece de hidrógeno, pero muestra señales evidentes de silicio; SN Ib (*en azul*) muestra helio, aunque no hidrógeno ni silicio, y SN II es rica en hidrógeno. (Las subclases SN II-p (*en verde*) y SN II-l (*en negro*) contienen hidrógeno, pero sus espectros varían tanto como lo hace su brillo en relación con el tiempo. Los espectros fueron obtenidos por Berverley H. Wills, Derek Wills y Russell M. Levreault, del Observatorio texano McDonald.

res de la estrella. La energía depositada en la estrella por los neutrinos, combinada con la onda de choque originada cuando el colapso cambia de signo, basta para arrebatar violentamente las capas exteriores de la estrella. La materia expulsada incluye la imponente envoltura de hidrógeno de la estrella, lo que explica las líneas de hidrógeno en el espectro de un episodio del Tipo II. La materia nuclear queda atrás, convertida en estrella de neutrones en el centro de la nube de productos expulsados que se va expandiendo.

Francesco Bertola, del Observatorio Astronómico de Padua, observó, hace más de veinte años, dos excepciones a esta dicotomía de tipos espectrales. Bertola informó que los espectros de dos supernovas, SN 1962L y 1964L, no mostraban señales de hidrógeno, que era el sello de los sucesos del Tipo I. Ahora bien, los espectros de las SN I clásicos, en su máxima luminosidad, constan de líneas de elementos de masa intermedia formados en la explosión: oxígeno, magnesio, silicio, azufre y cadmio; todas las líneas presentan su correspondiente corrimiento Doppler causado por la rápida expansión de los productos expulsados de la supernova. Las excepciones de Bertola, que él llamó "supernovas peculiares" del Tipo I, carecían de una de las líneas más intensas: una línea de absorción a 6150 angstrom, que se atribuye al silicio ionizado. (Las líneas de absorción de un elemento se manifiestan cuando el átomo o ion se halla ante un brillante fondo de radiación, que difunde fuera de la visual, absorbiendo y reemitiendo fotones.)

Como con tantas otras "excepciones" inexplicadas, las observaciones de Bertola no llamaron la atención, si dejamos de lado alguna que otra referencia ocasional en la bibliografía pertinente, incluida por honradez profesional. La situación cambió espectacularmente con el descubrimiento, por parte de Evans, de las supernovas 1983N y 1984L. Bertola hubo de basarse en espectros fotográficos, a partir de los cuales es difícil juzgar la intensidad absoluta de cada línea. Los nuevos espectrógrafos digitales, por el contrario, no se limitan a registrar la presencia de una línea, sino que proporcionan también datos cuantitativos sobre la intensidad y forma del perfil espectral. Esos cabos sueltos representados por SN 1962L y 1964L sirvieron entonces para descorrer una cortina y abrir un nuevo panorama a la investigación de las supernovas.

En sus términos más amplios, los espectros de 1983N y 1984L las adscribieron al Tipo I: no mostraban señal de hidrógeno. Les faltaba también la línea del silicio de 6150 angstrom, dato que las ponía en relación con los peculiares sucesos del Tipo I de Bertola. No obstante, los espectros obtenidos en la época de máximo brillo manifestaban el mismo agrupamiento de líneas entre 4000 y 6000 angstrom (debido, quizás, a los estados excitados del hierro) que presentan los espectros de sucesos del Tipo I a las tres semanas de edad. Los sucesos peculiares "nacieron viejos". Añeja expresión que aquí daba a entender que los sucesos peculiares eran variantes de sucesos típicos de la clase I, sin perder, no obstante, su relación genérica con ellos.

Esa relación fue desapareciendo conforme avanzábamos en el estudio de los espectros. Vimos que los gases en expansión de las supernovas peculiares contenían helio, elemento nunca detectado con nitidez en los espectros de sucesos clásicos de los Tipos I o II. Los espectros mostraban una intensa línea de absorción a 5700 angstrom; era ésta la frecuencia a la que cae la línea de 5876 angstrom del helio neutro cuando sufre un corrimiento Doppler correspondiente a una velocidad de 7500 kilómetros por segundo, que es una velocidad de expansión típica para la atmósfera de una supernova. El mismo corrimiento Doppler llevó otras tres líneas del helio a coincidir con características espectrales observadas. Los nuevos sucesos (designados por SN Ib) constituían una raza distinta de los sucesos clásicos del Tipo I.

Otras características de los sucesos sugieren que, en realidad, tienen cierta relación con las explosiones del Tipo II. Los sucesos clásicos del Tipo I (ahora SN Ia) aparecen frecuentemente en galaxias elípticas, que están pobladas principalmente por estrellas pequeñas y antiguas: las progenitoras que

requiere el modelo de la explosión termonuclear. Los sucesos del Tipo II, en cambio, suelen producirse en las llamadas regiones HII, es decir, bolsas de hidrógeno ionizado, comunes en los brazos de las galaxias espirales, que representan el lugar de nacimiento de las estrellas e incorporan muchas estrellas jóvenes de gran masa. SN 1983N, SN 1984L y los dos sucesos de Bertola parecían caer en o cerca de regiones HII.

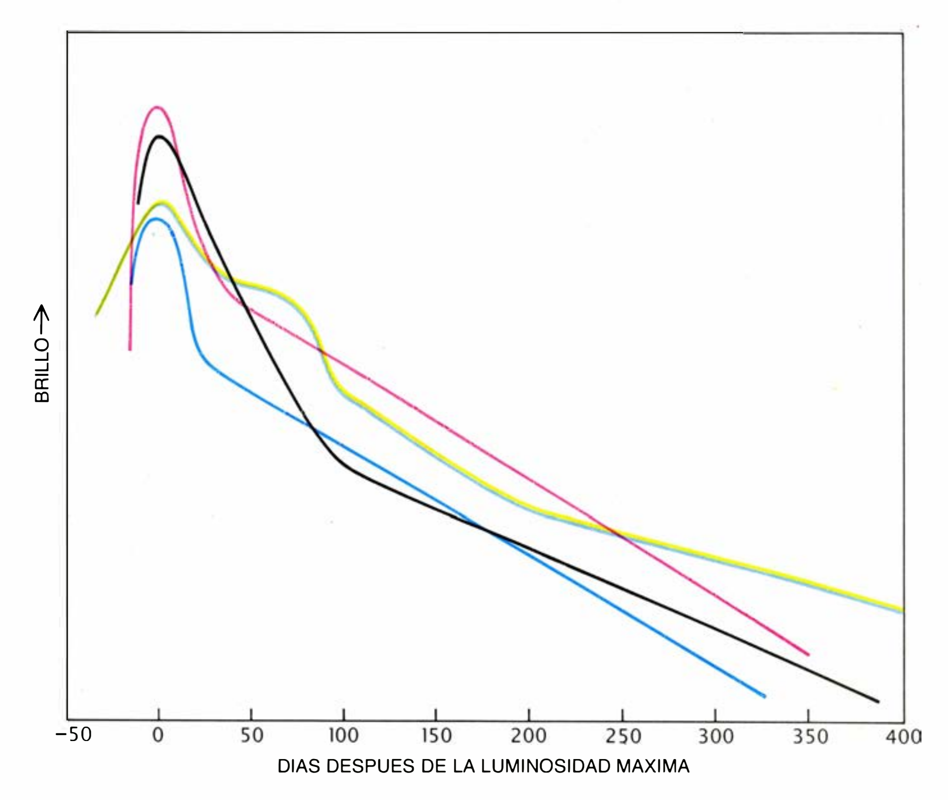
Los sucesos compartían una segunda peculiaridad de SN II: señales de radio detectables. Usando la Gran Distribución de radiotelescopios de Nuevo México, Richard A. Sramek, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, Nino Panagia, del Instituto de Ciencias del Telescopio Espacial, y Kurt W. Weiler, de la Fundación Nacional de Ciencias, observaron radioemisiones de SN 1983N y de SN 1984L; construyeron la curva de "luminosidad" de la señal de radio a diversas frecuencias conforme disminuía la potencia. Tales emisiones, según una plausible explicación debida a Roger A. Chevalier, de la Universidad de Virginia, se originan cuando la onda de choque de una supernova alcanza un "viento" circumestelar, compuesto principalmente de hidrógeno que ha salido despedido de la estrella antes de la explosión. Las estrellas de gran masa, muy brillantes, expelen ese viento de manera natural, por presión de radiación; la explicación requiere, por tanto, que la estrella que explota sea de gran masa o tenga una compañera de masa ingente.

¿Cómo entender los rasgos que presentaba SN Ib: sus verosímiles relaciones con el Tipo I y con el Tipo II y la existencia de helio, que aleja la nueva categoría de los dos tipos clásicos? ¿Qué clase de explosión estaba ocurriendo y en qué clase de estrella? Para interpretar esos datos, recurrimos a una nueva herramienta analítica: los modelos de ordenador que predicen el espectro de la luz emitida por una supernova de determinadas características. La atmósfera en expansión de una supernova se representa en el modelo mediante una familia de capas concéntricas, cada una de las cuales contiene materia de cierta composición, densidad, temperatura y velocidad radial. El cálculo sigue la pista del intercambio radiativo a través de las capas: el modo como, a cada frecuencia, se crea, se difunde o se absorbe la luz por átomos excitados o iones mientras progresa hacia la superficie visible de la supernova. El resultado del cálculo es el espectro de la explosión predicho.

David R. Branch, de la Universidad de Oklahoma, fue el pionero de estos cálculos. En las versiones actuales, se supone que la radiación se propaga a través de materia en equilibrio termodinámico local, esto es, materia en la cual la proporción de cada especie de átomo o ion en un determinado estado excitado depende de la energía del estado y de la temperatura local. Los cálculos toman también en consideración el efecto de la rápida expansión de la supernova sobre el acoplamiento entre radiación y materia. En este contexto, por ejemplo, se produce un fuerte efecto Doppler porque la velocidad de expansión de una supernova aumenta con la distancia desde el centro. Desde el punto de vista de cualquier átomo de la materia expulsada, la materia está retrocediendo en todas direcciones; de ello resulta que la radiación provinente de todas las direcciones sufre un corrimiento hacia el rojo (corrimiento Doppler hacia el extremo rojo, o de mayor longitud de onda, del espectro). Además, la materia expulsada se está moviendo a una fracción apreciable de la velocidad de la luz, lo que engendra efectos relativistas.

Para permitir esos efectos de rápida expansión, las ecuaciones del intercambio radiativo se resuelven con respecto a un sistema de referencia que se está moviendo con la materia. El cálculo de la interacción entre materia y radiación en un sistema de referencia que se mueve con ellas da las frecuencias e intensidades que se transmiten a la capa siguiente. Una transformación final de los resultados, desde el sistema de referencia móvil de los productos expulsados por la supernova hasta el sistema estacionario del observador, rinde el espectro predicho. Tales cálculos ponen a prueba la memoria y velocidad de los más rápidos superordenadores.

Los esfuerzos empeñados en construir modelos sencillos de supernovas que reprodujesen los espectros observados de los sucesos SN Ib han permitido penetrar en su composición y masa. Los modelos establecían perfiles razonables de temperatura y densidad, así como composición en la que habría gran cantidad de helio y pequeñas fracciones de oxígeno y carbono, elementos que se supone abundan en los núcleos de las estrellas de gran masa. Un Cray XMP/24, en el Centro de Cálculo de Alta Velocidad de la Universidad de Texas, auxiliado por



3. CURVAS DE LUMINOSIDAD características de los distintos tipos de supernova y variación de su brillo (representada en escala logarítmica). La curva de luminosidad de SN Ia (*en rojo*), perteneciente a la clase más brillante, cae con firmeza después de la máxima luminosidad, tras lo cual comienza un suave descenso exponencial que tiene una semivida de unos 50 días; manifiesta el comportamiento esperado en la hipótesis de que dichas supernovas brillen por desintegración radiactiva. Las SN Ib (*en azul*), menos luminosas, presentan una curva que no acaba de entenderse, si bien se cree que la última parte de ésta obedece a una desintegración radiactiva. Los sucesos II-p (*en verde*) deben su nombre a la meseta (*plateau*) que alcanza su brillo poco después de conseguir su máximo; mientras tanto, las supernovas del Tipo II-1 (*en negro*), que contienen menos hidrógeno y encierran un mecanismo de explosión distinto, se atenúan linealmente.

varios superordenadores más de otros centros patrocinados por la Oficina de Cálculo Científico Avanzado de la Fundación Nacional de Ciencias, proporcionó la capacidad de cálculo necesaria.

El espectro calculado para un modelo compuesto de un 90 por ciento de helio, 1 por ciento de carbono, 9 por ciento de oxígeno y mínimas fracciones de elementos más pesados (composición que se cree típica de las estrellas de gran masa) se parecía algo al espectro observado. Sin embargo, la línea de absorción del helio —el rasgo más importante— resultaba demasiado débil. Puesto que ni siquiera con una proporción de helio muy alta se podía reproducir la línea observada, el helio de la atmósfera de una SN Ib debía estar excitado más allá del equilibrio termodinámico. Multiplicando por 100 el número de átomos de helio que, de acuerdo con la teoría, habían de ocupar determinados niveles en el equilibrio, se obtuvo un espectro teórico que se parecía mucho al de SN Ib en su máximo.

Desconocemos qué podría generar helio con una excitación anómala tan alta en una supernova real. Algún papel desempeñará la densidad, extremadamente baja, de los productos expulsados y la baja frecuencia resultante de colisiones entre los átomos. Las colisiones, que tienden a devolver los átomos o iones excitados a niveles de energía más bajos, actúan de fuerza recuperadora en el mantenimiento del equilibrio termodinámico. La posibilidad de que la intensa línea del helio resulte de una falta de compensación entre la excitación (por radiación procedente de capas más internas) y la desexcitación (por los choques) viene apoyada por la observación de que las líneas de helio adquieren mayor intensidad con el envejecimiento y enrarecimiento de la supernova. Mientras que bastó con centuplicar la intensificación en las poblaciones de niveles excitados para reproducir el espectro de SN 1984L en su máximo esplendor, hubo que multiplicar por 10^4 para obtener un espectro teórico que concordase con el de la supernova tres semanas más tarde.

Los cálculos de balance radiativo mostraron así que las características espectrales de SN Ib podrían originarse en la explosión de una estrella de gran masa rica en helio. Variando la masa de la estrella modelo para obtener el mejor ajuste con los espectros observados se vio que la masa de la materia en explosión tenía que multiplicar varias veces la solar.

Los modelos confirmaron también que otros dos sucesos pertenecían a la clase SN Ib. SN 1983I y 1983V no despertaron especial atención cuando fueron descubiertos respectivamente por D. Yu. Tsvetkov, del Instituto Astronómico Sternberg, y por Evans. J. H. Elias y sus colaboradores del Caltech incluyeron SN 1983I dentro del Tipo Ib, apoyándose en la semejanza de su curva de luz en las longitudes de onda del infrarrojo con las curvas de luz de SN 1983N y 1984L. Los espectros sugerían, asimismo, cierta afinidad con los SN Ib: carecían de las señales de hidrógeno y de la línea de silicio de 6150 angstrom. Pero la línea de helio de 5700 angstrom aparecía tan sólo levemente disminuida en su intensidad.

La relación de esos sucesos con los SN Ib recibió apoyo argumental: una variante del modelo teórico que reproducía los espectros originales SN Ib podía explicar también los nuevos espectros. La variante en cuestión establecía una atmósfera enriquecida en carbono y oxígeno y enrarecida en helio. El oxígeno y el carbono pierden electrones fácilmente para convertirse en iones, y los electrones libres difunden los fotones de todas las longitudes de onda. La difusión de electrones reduce el contraste entre una caída provocada por la absorción y las longitudes de onda vecinas; en este caso, como mostró el modelo, la difusión de electrones debida al aumento del oxígeno y el carbono diluyeron todavía más las líneas de helio, ya debilitadas por la disminución de este gas. Un modelo que contenía 10 por ciento de helio, 10 por ciento de carbono y 80 por ciento de oxígeno, de nuevo con pequeñas adiciones de elementos más pesados, dio una concordancia adecuada con los espectros observados. SN 1983I, 1983N, 1983V y 1983L pertenecían, al parecer, a la clase SN Ib; se trata, empero, de una clase heterogénea, que abarca sucesos de una amplia variedad en la relación de helio a oxígeno.

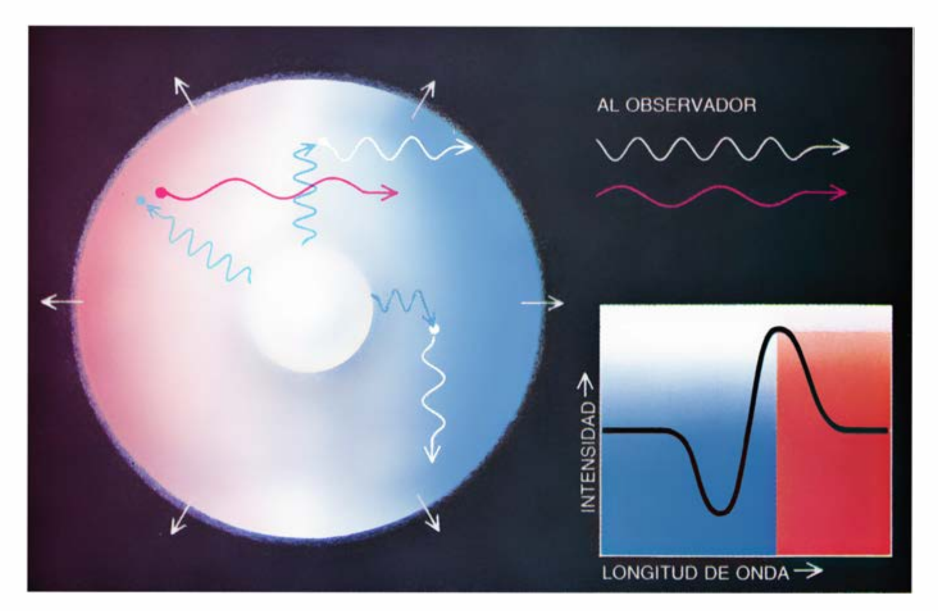
Estos modelos teóricos de las atmósferas ayudan a entender los primeros días de una supernova: el mes inmediato a la explosión, cuando la materia expulsada es ópticamente espesa y cada fotón interacciona muchas veces con los electrones o los iones del gas que se mueve a alta velocidad. La radiación detectada revela sólo las propiedades que la supernova presenta en la superficie de la región ópticamente espesa, es decir, la zona de donde los fotones pueden escapar sin trabas. Las capas más profundas pueden explorarse a medida que la materia se expande y se enrarece. Por último, transcurrido el mes, la materia expulsada se hace ópticamente tan fina que la radiación procedente de cualquier parte de la materia en expansión puede llegar de manera directa hasta el observador. Este

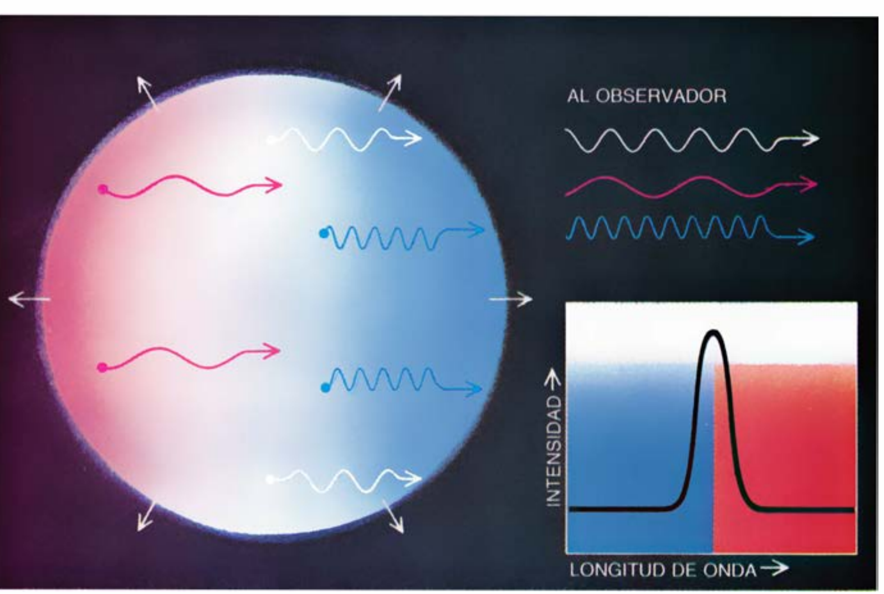
4. ESPECTROS TEORICOS calculados para la explosión de una estrella de gran masa, compuesta de 90 por ciento de helio, 9 por ciento de oxígeno, 1 por ciento de carbono y trazas de elementos más pesados; se comparan con los espectros observados de una supernova Tipo Ib (SN 1984L) cerca del momento de máximo brillo (*en negro*) y tres semanas más tarde (*en gris*). El parecido sugiere que los sucesos SN Ib se originan en estrellas de gran masa ricas en helio. Para hacer concordar la intensa línea de absorción del helio a 5700 angstrom, hubo que suponer que la fracción de átomos de helio excitados es muchas veces mayor de lo que la temperatura de la atmósfera de la supernova justificaría. En el modelo que da la mejor concordancia con el espectro de máxima luminosidad (*oscuro*), el helio excitado se ha multiplicado por 100; un factor de 10^4 aporta la mejor concordancia con el espectro tres semanas después de la máxima luminosidad (*claro*).

resto tenue de supernova, que constituye la fase supernebular, aporta sus propios datos con respecto a la naturaleza de las SN Ib.

El espectro de una supernova cambia al entrar en la fase supernebular. En los primeros días después de la explosión, lo forman líneas "permitidas", es decir, líneas que representan la absorción o emisión de fotones en el curso de transiciones de energía favorecidas por las leyes de la mecánica cuántica. Sólo esas transiciones, que se producen rápidamente, pueden dejar su marca en el espectro de la atmósfera en expansión; las transiciones que ocurren con mayor lentitud se ven entorpecidas por colisiones atómicas, que disipan la energía de un átomo o ion excitado antes de que pueda radiarse. En una representación espectral de la intensidad frente a la longitud de onda, cada línea permitida aparece como un máximo de emisión yuxtapuesto a una bajada (indicando absorción) a una longitud de onda ligeramente más corta. La materia que avanza directamente hacia el observador produce el mínimo al difundir fotones desde las regiones más profundas y opacas de la supernova.

En contraste con ello, las líneas "prohibidas" dominan el espectro en la fase supernebular. Tales líneas representan transiciones de desarrollo tan lento que jamás se observan en los gases de laboratorio. Pero se hallan primadas en el enrarecido gas supernebular, donde la inmensa distancia entre colisiones sucesivas posibilita que cada átomo o ion absorba y libere energía casi aislado. Como resulta muy improbable que un fotón liberado sea difundido en ese entorno ópticamente fino, las líneas prohibidas aparecen sólo como máximos de emisión.





5. ENVEJECIMIENTO DE UNA SUPERNOVA y modificación de sus características espectrales. En la fase inicial de la explosión (*arriba*), la luz se emite en la superficie de una región central ardiente y opaca; se dispersa en la materia circundante y semitransparente. La supernova se está expandiendo; los fotones que proceden de la materia que avanza moviéndose hacia el observador están corridos hacia el azul (esto es, desplazados por efecto Doppler hacia longitudes de onda más cortas); los fotones que provienen de materia que se está moviendo lateralmente mantienen su longitud de onda de reposo, y los fotones de la materia que se está alejando se dirigen hacia el rojo. Los elementos que hay a lo largo de la visual del núcleo difunden los fotones, alejándolos del observador; de ese modo, aparece un mínimo de absorción corrido hacia el azul en cada característica espectral. Un máximo de emisión acompaña a cada mínimo; el máximo se debe a fotones que, emitidos fuera de la visual, se difunden hacia el observador. Después de un mes, en la fase supernebular (*abajo*), toda la materia es transparente y la luz llega directamente al observador desde cualquier punto. En esta fase se difunden muy pocos fotones y cada característica espectral forma un máximo de emisión puro.

Además de los elementos, que manifiestan diferentes rasgos espectrales en la fase supernebular, está la propia supernova, considerada como un todo, que evidencia una nueva composición, enriquecida en elementos más pesados que se hallaban ocultos al principio de la explosión. A este propósito, Timothy S. Axelrod, del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, ha demostrado que el espectro supernebular de los sucesos SN puede reproducirse superponiendo líneas de emisión prohibidas, procedentes de una nube en expansión de hierro y cobalto ionizados: estos son los productos que cabría esperar de una combustión termonuclear descontrolada que produce, según se cree, las supernovas del Tipo Ia. James Graham, Peter Meikle y sus colaboradores, del Colegio Imperial de Ciencia y Tecnología de Londres, han identificado pequeñas cantidades de hierro en la fase supernebular de una supernova del Tipo Ib (SN 1983N).

La fase supernebular de los sucesos SN Ib muestra también una propiedad enteramente distintiva, a saber, la señal de una gran cantidad de oxígeno. Se llegó a ella de una manera indirecta a través del descubrimiento de SN 1985F por Alexei V. Filippenko, de la Universidad de California en Berkeley, y Wallace L. W. Sargent, del Caltech. Observaron la supernova cuando se hallaba en su fase supernebular, muchos meses después de su máxima luminosidad. Su espectro supernebular no tenía precedentes, con líneas de emisión de oxígeno muy intensas.

Algunos meses más tarde, un espectro de SN 1983N, obtenido a los ocho meses de la máxima luminosidad, se corregía de desviaciones instrumentales y mostró una sorprendente seme-

SUPERNOVA	POSICION EN LA GALAXIA HUESPED	OXIGENO SUPERNEBULAR	HELIO
1954A	?	¿ALTO?	?
1962L	REGION H II	BAJO	?
1964L	BRAZO ESPIRAL	BAJO	?
1982R	?	¿BAJO?	?
1983I	BRAZO ESPIRAL	BAJO	?
1983N	REGION H II	ALTO	ALTO
1983V	REGION H II	BAJO	?
1984L	REGION H II	ALTO	ALTO
1985F	REGION H II	?	ALTO
1986M	?	¿BAJO?	?

6. RELACION DE SUPERNOVAS DEL TIPO IB, sugeridas y confirmadas, junto con los rasgos definitorios de las mismas. Se han incluido los primeros candidatos SN Ib rescatados del archivo espectral.

janza con el espectro de SN 1985F. El parecido condujo a dos conclusiones importantes. En primer lugar, las supernovas del Tipo Ib evolucionaban hacia una fase supernebular única, dominada por el oxígeno, en notable contraste con la fase supernebular de SN Ia y de SN II (dominada por las líneas de hidrógeno, como en las épocas iniciales de la explosión). En segundo lugar, SN 1985F no constituía ningún caso singular y había que adscribirlo a la clase SN Ib.

Se está dedicando un gran esfuerzo a la interpretación del espectro supernebular de SN Ib y a la creación de un modelo que describa esa fase de la explosión. Presumiblemente, el espectro registra capas interiores de productos expulsados y enriquecidas en oxígeno; pero, ¿cuál es la fuente de ese oxígeno? Se admite que las estrellas de gran masa y, en algunos modelos, las enanas blancas posean regiones ricas en oxígeno. La intensidad de las líneas del oxígeno supernebular, que parecen indicar varias masas solares de oxígeno, nos sugiere que el interior de una estrella de gran masa en desintegración es el origen más probable.

Así pues, los datos espectrales, las radioobservaciones y la asociación de los sucesos SN Ib con regiones HII se conjugan para apoyar la hipótesis según la cual las supernovas de esta nueva clase tendrían su origen en estrellas de gran masa. Pero otras razones que tienen que ver con las poblaciones estelares y su evolución, aportadas por modelos teóricos más avanzados, conducen a otras hipótesis acerca de los progenitores.

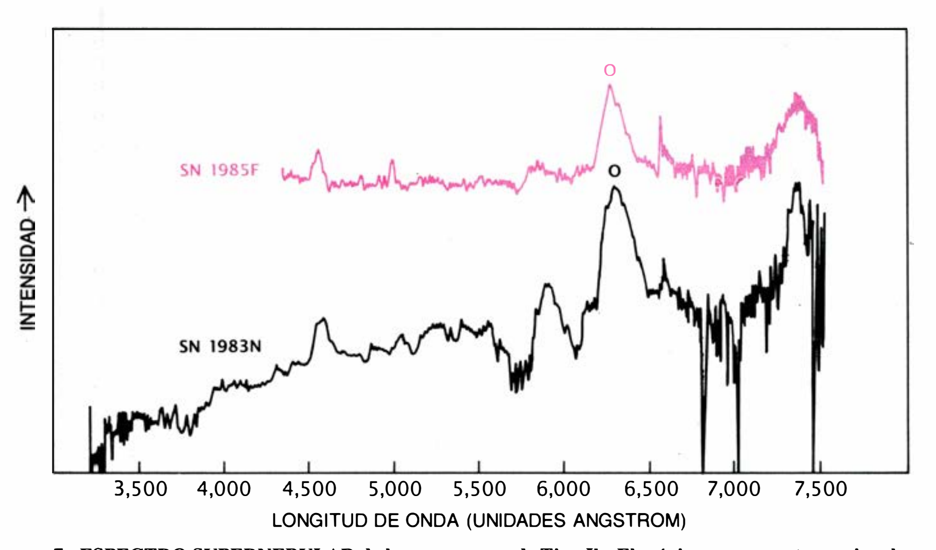
En primer lugar, no es probable que las explosiones se produzcan sólo en las estrellas de mayor masa conocidas, las que trascienden la treintena de masas solares. Tales estrellas son demasiado escasas para explicar la creciente lista de sucesos SN Ib [*véase la figura 6*], lista que sugiere que las explosiones se producen con la misma frecuencia que SN Ia y SN II. Además, la luz se difundiría lentamente hacia el exterior de una supernova de gran masa, lo que daría a las curvas de luminosidad de SN Ib una forma muy diferente de la observada. Finalmente, los modelos de evolución sugieren que el intenso viento estelar de una estrella de gran masa acabaría por eliminar, no sólo todo el hidrógeno de la estrella (lo que estaría de acuerdo con la composición observada de SN Ib), sino también todo su helio.

¿Podrían los SN Ib representar enanas blancas en explosión contrariamente a las indicaciones de que las estrellas progenitoras deben ser jóvenes y de gran masa? Los modelos de atmósferas muestran que las líneas espectrales del abundante hierro de una enana blanca en explosión eliminarían cualquier raya del helio, lo que determina que esta posibilidad resulte también muy remota.

Hay una región intermedia: los núcleos de estrellas que, en tiempos, habían tenido entre 8 y 25 masas solares y han perdido su envoltura de hidrógeno. Se cree que las estrellas en ese dominio de masas dan cuenta de la mayor parte de los sucesos SN II. Los SN Ib conocerían presumiblemente el mismo mecanismo de explosión: un colapso del núcleo que concentraría parte de él en una estrella de neutrones y generaría una onda de choque que expulsaría el resto de la masa estelar. Al principio, las capas exteriores y ricas en helio de la estrella progenitora quedarían al descubierto; luego, sus capas intermedias, ricas en oxígeno.

¿Cómo podría la estrella progenitora perder su envoltura de hidrógeno? Las estrellas de menos de 25 masas solares carecen de luminosidad para expulsar sus envolturas espontáneamente, por medio de su viento estelar. Contarán, a buen seguro, con una estrella compañera que atraiga su capa de hidrógeno, dejando descubierta la de helio y elementos más pesados. En este supuesto, los sucesos SN Ib diferirían de muchos episodios del Tipo II en que estos últimos provienen de estrellas de gran masa que, o bien son solitarias o bien poseen una compañera muy distante con la que nunca llegan a interaccionar; las SN Ib, por otra parte, se desarrollan entre la fracción (tal vez la mitad) de las estrellas del mismo intervalo de masas que, sin embargo, sí poseen una compañera próxima.

Esta sugerencia podría resolver el rompecabezas de la evolución estelar planteado por una importante clase de fuentes binarias de rayos X; nos referimos a las que constan de una estrella de neutrones en órbita alrededor de una compañera de bastante masa. (La materia que cae de la compañera sobre

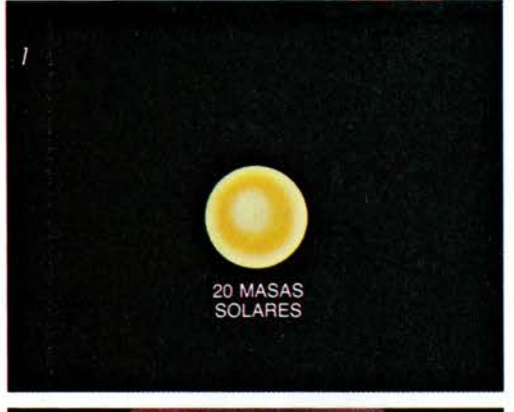


7. ESPECTRO SUPERNEBULAR de las supernovas de Tipo Ib. El máximo que muestra sugiere la presencia de oxígeno. Este elemento, detectado por primera vez en la fase supernebular de SN 1985F, y más tarde en el archivo espectral de SN 1983N, se origina en capas internas de la estrella progenitora ricas en oxígeno. El espectro fue obtenido por Harriet Dinerstein y D. Garnett (1985F) y por M. Gaskell (1983N).

la estrella de neutrones emite los rayos X al calentarse y comprimirse.) Presumimos que tales fuentes de rayos X se originaron como sistemas binarios constituidos por dos estrellas de gran masa, la mayor de las cuales evolucionó hasta colapsar formando una estrella de neutrones. La pérdida brusca, durante la explosión, de la mayor parte de la masa de la estrella podría muy bien haber desestabilizado el sistema binario; y por ende, la estrella habría ya perdido su capa exterior de hidrógeno (y con ella la mayor parte de su masa) en el espacio o en la atracción gravitatoria de su compañera. De donde se infiere la deficiencia de hidrógeno mostrada por el núcleo estelar que acabó por explotar. En otras palabras, las fuentes binarias de rayos X podrían ser reliquias de supernovas del Tipo Ib.

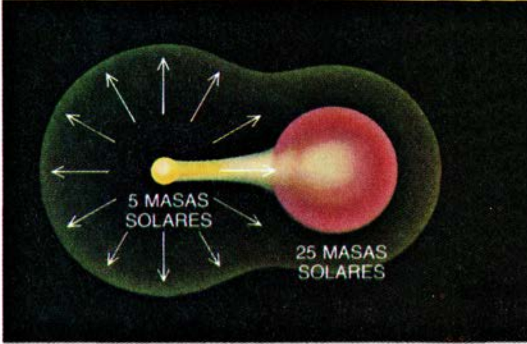
En un planteamiento más general, la relación estrecha, verosímil, entre los sucesos SN Ib y SN II significa que la nueva clase de supernovas puede aportar ideas sobre las explosiones clásicas de colapso del núcleo. El empeño puesto en la comprensión del proceso mediante el cual el colapso del núcleo de una estrella de gran masa puede conducir a una explosión ha consumido años de trabajo humano y cientos de horas de ordenador; les ha faltado, además, la vertiente observacional con la que contrastar la teoría. La espesa envoltura de hidrógeno de los sucesos de Tipo II enmascara los rasgos espectrales procedentes de capas más profundas. Los modelos de ordenador aplicados a las observaciones directas del interior de la supernova disponibles en las explosiones SN Ib deben permitir vislumbrar el funcionamiento interno del colapso del núcleo.

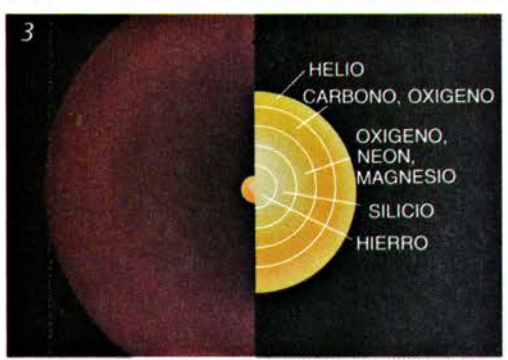
Al haberse caído en la cuenta de que

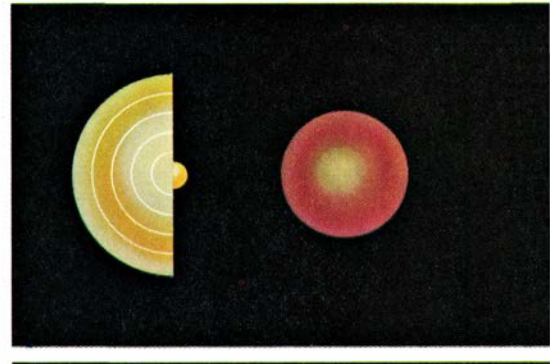
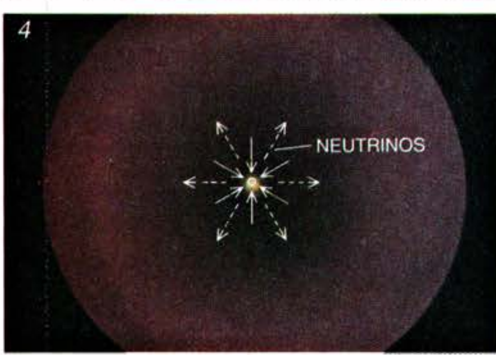


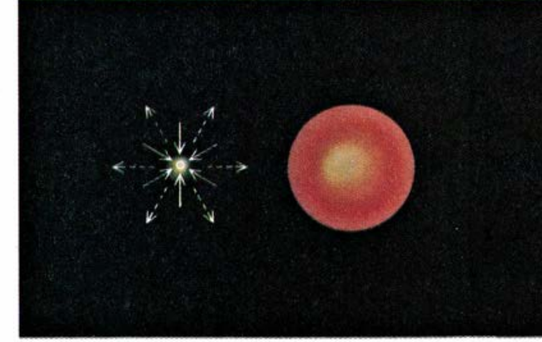
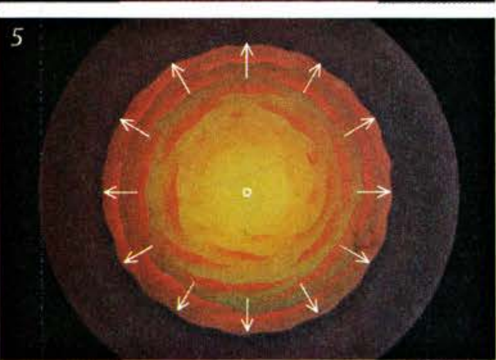


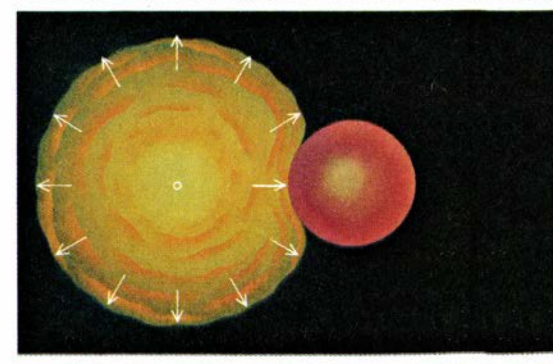
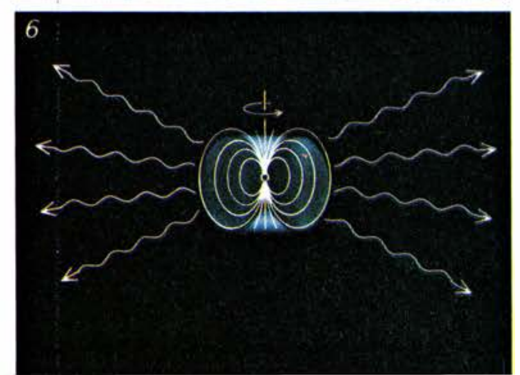


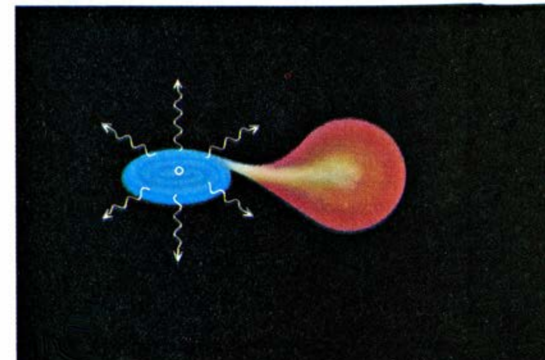




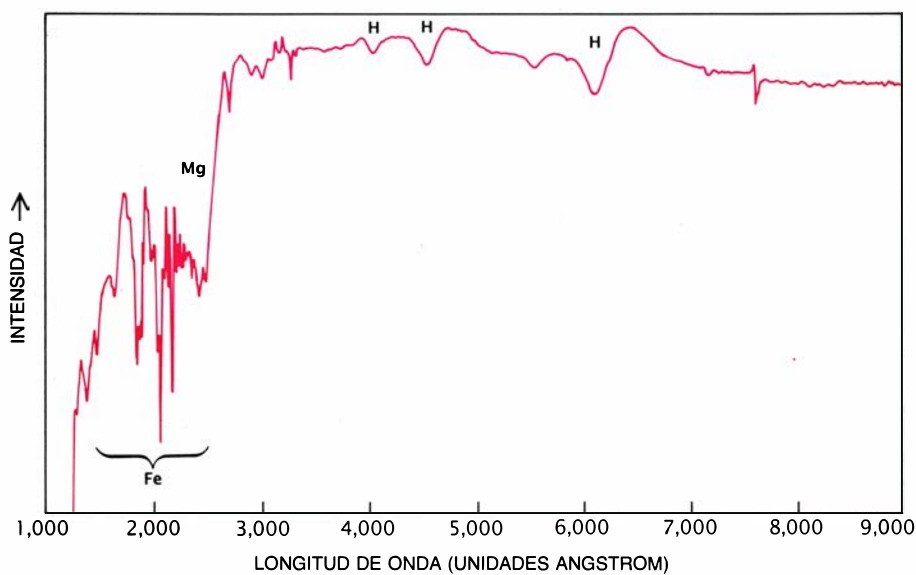



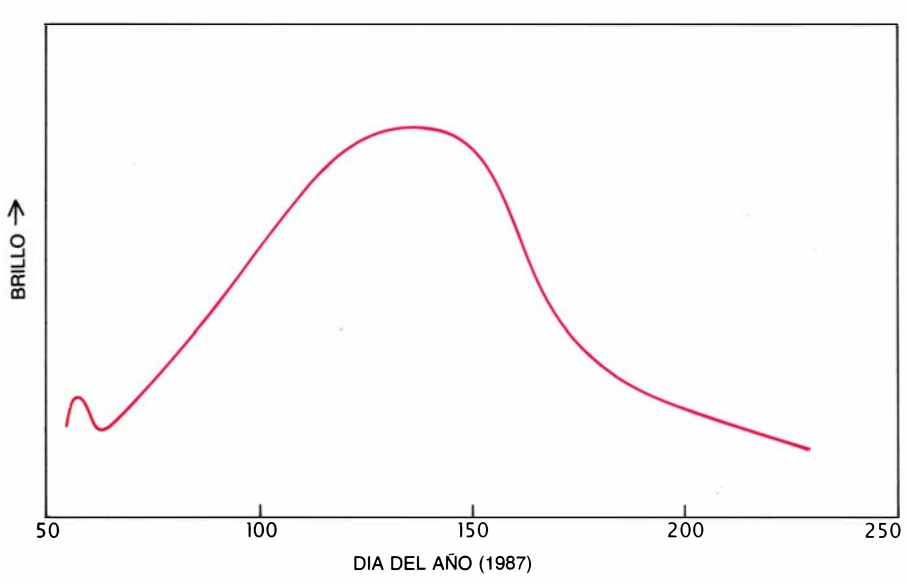





8. DISTINTOS SUPUESTOS RELACIONADOS pueden dar lugar a supernovas del Tipo II (*izquierda*) y del Tipo Ib (*derecha*). Una explosión del Tipo II puede comenzar con una estrella de gran masa (*1*) que ha envejecido y se ha hinchado hasta formar una supergigante roja, estrella que consta de un amplio manto de hidrógeno (*2*) y un núcleo estratificado de elementos más pesados (*3*). El núcleo colapsa para formar una estrella de neutrones, liberando neutrinos (*4*) y generando una onda de choque que expulsa las capas exteriores de la estrella (*5*). La explosión deja como resto un púlsar: potente fuente de radioondas producida cuando la estrella de neutrones gira rápidamente dentro de su propio campo magnético (*6*). La estrella progenitora de SN Ib podría diferir sólo en poseer una compañera binaria de gran masa. A medida que la estrella se hincha, parte de la materia sale expelida del sistema y otra parte se aglomera sobre la compañera, dejando un núcleo sin envoltura que colapsa y explota exactamente igual que en un suceso del Tipo II. En virtud de la aparición de la supernova, la estrella de neutrones acumularía materia de la estrella compañera. Esta materia emitiría rayos X cuando se caliente y comprima.







9. BRILLO DE LA SUPERNOVA 1987A junto a una nebulosa engendradora de estrellas, la 30 Doradus, en la Gran Nube de Magallanes (*arriba*). El espectro de la supernova (*centro*) resulta de la combinación del espectro de luz visible suministrado por Mark M. Phillips, del Observatorio Interamericano de Las Campanas, y un espectro ultravioleta del satélite *IUE* (*International Ultraviolet Explorer*), proporcionado por Robert P. Kirshner, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard. Las líneas de hidrógeno adscriben el suceso al tipo II. Pero el episodio presenta varios rasgos anómalos; entre ellos, la morfología de las bandas de absorción del hidrógeno, el espectro ultravioleta y la forma de la curva de luminosidad (*abajo*). La curva, construida por Kirshner y George Sonneborn, de la Corporación de Ciencias del Cálculo, a partir de datos del *IUE*, muestra un decrecimiento anómalo del brillo tras la explosión, un crecimiento hacia el máximo insólitamente lento y un decrecimiento exponencial alimentado, quizá, por la desintegración radiactiva.

el colapso del núcleo generaba un espectro que recuerda el de los sucesos clásicos del Tipo I, pese a su muy diferente mecanismo de explosión, la atención en la clasificación de las supernovas ha aumentado. La física de las supernovas no está constreñida, evidentemente, por esquema alguno de clasificación espectral. Lo mismo que cualquier mecanismo de explosión puede producir un espectro deficitario en hidrógeno, tenemos ahora razones poderosas para pensar que ciertos sucesos de Tipo II podrían representar una explosión termonuclear enteramente disruptiva dentro de una envoltura de hidrógeno. Conforme progresa nuestro conocimiento de las explosiones de supernova, el sistema de clasificación actual irá perdiendo interés.

Comenzaba a apreciarse esa nueva complejidad cuando SN 1987A brilló de repente en el cielo nocturno. Todavía se está en fase de recolección de datos y ya se trabaja febrilmente en su análisis; nadie duda, empero, de que el nuevo suceso representa el colapso de una estrella de gran masa en una forma distinta de las anteriores. En cierto sentido, la explosión proporcionó una espectacular confirmación de la teoría: el estallido de neutrinos, procedentes del colapso del núcleo estelar en una estrella de neutrones, se observó, por primera vez, directamente. Detectores en Japón y en Ohio (gigantescas piscinas de agua, equipadas con los aparatos necesarios y alojadas en las entrañas de unas minas, para protegerlas de los rayos cósmicos) registraron la llegada del brote explosivo de neutrinos, horas antes de que la luz de la supernova llegase a la Tierra.

La supernova en cuestión presenta, en otro sentido, un reto teórico. El espectro muestra señales inequívocas de hidrógeno, lo que obliga a inscribir el suceso en la clase SN II. Ahora bien, las estrellas de gran masa, al final de su corta vida, cuando sus núcleos se hallan prestos para el colapso, suelen hincharse y formar supergigantes rojas y frías. La estrella progenitora de SN 1987A se ha identificado, rebuscando en imágenes anteriores, como una supergigante azul, una fase más compacta y, por consiguiente, más caliente de la carrera de una estrella de gran masa; hasta entonces nadie sabía que éstas explotaran. Situábase su masa entre 15 y 20 solares, el mismo intervalo presumido para los SN Ib y algunos SN II.

La evolución de la propia explosión demanda un progenitor compacto: los neutrinos, liberados en el momento del

colapso del núcleo, llegaron, a lo más, tres horas antes de la primera luz, generada cuando la onda de choque alcanzó la superficie de la estrella. Fundándose en la demora temporal y en la velocidad estimada de la onda de choque, W. David Arnett, de la Universidad de Chicago, Stanford Woosley y sus colaboradores, de la Universidad de California en Santa Cruz, y varios grupos de Alemania Occidental, la Unión Soviética, el Japón y otros lugares, han determinado que el radio de la progenitora de la supernova sería de unas 30 veces el radio del Sol, unas 25 veces menor que el de una supergigante roja.

La naturaleza compacta de la progenitora explica probablemente otro rasgo notable de SN 1987A: a pesar de su intensa luminosidad, gracias a su cercanía relativa, no alcanzó el brillo absoluto de una SN II o una SN Ib. En cualquier supernova originada por el colapso de un núcleo, parte de la energía depositada por la onda de choque sirve para dilatar la estrella y hacerla suficientemente difusa para radiar de una manera eficaz. Cuanto menor sea la estrella progenitora, tanto más calor se convertirá en movimiento, y tanta menos energía quedará disponible para hacer brillar la supernova. (Los SN Ia, que se originan en enanas blancas, no brillarían si no fuese por la liberación retrasada de calor debido a la desintegración radiactiva.)

SN 1987A se atenuó anómalamente en los primeros siete días posteriores a su descubrimiento; durante las 10 semanas siguientes fue adquiriendo luminosidad, en una subida sin precedentes, hasta alcanzar su máximo. Entró luego en una caída exponencial de brillo, según lo previsible en el caso de que la fuente de esta última iluminación sea la desintegración del cobalto y níquel radiactivos producidos en la explosión. Se sospecha ahora que la desintegración radiactiva contribuye al brillo, no sólo de los sucesos SN Ia, sino también de los SN Ib y algunos SN II.

Una cosa está clara: las observaciones ininterrumpidas de SN 1987A alterarán y, al mismo tiempo, ampliarán nuestra comprensión del colapso de las estrellas de gran masa. Es de esperar que se progrese más todavía al integrar todos nuestros conocimientos. La comparación de los sucesos de los Tipos Ia, Ib y II con SN 1987A aportarán un volumen sustancial de información y permitirán abordar la miríada de manifestaciones de las catástrofes estelares.

Cromosomas artificiales

En sus inicios, la ingeniería genética se limitaba a manipular genes uno a uno. Las mismas estrategias se utilizan ahora para crear cromosomas e investigar su comportamiento

Andrew W. Murray y Jack W. Szostak

Los genes de los organismos superiores se encuentran en los cromosomas, filamentos de ADN cuya longitud supera en mucho la de cualquier gen. Las células humanas poseen 46 cromosomas, las de la planta del guisante 14 y, las de la mosca del vinagre, ocho. En esta era de manipulaciones genéticas, los genes constituyen el principal foco de atención, mientras que los cromosomas serían meros vehículos, encargados de transportar a aquéllos durante la división celular. Y en realidad eso es lo que hacen los cromosomas. Su trabajo, sin embargo, no es sencillo, y seguimos desconociendo el mecanismo subyacente. ¿Cómo saben los cromosomas hacia dónde deben dirigirse durante la división celular?

Dispuestos a hallar respuesta a esa pregunta, nos embarcamos hace cinco años en un proyecto cuyo objetivo era construir cromosomas a partir de sus materias primas. Como artífices de tales moléculas, podríamos sustraerles algunos elementos funcionales y observar el comportamiento de los cromosomas en ausencia de tales elementos. Hemos logrado fabricar cromosomas artificiales que se replican fielmente en las células vivas y que se distribuyen equitativamente entre las dos células "hijas" cuando la célula "madre" se divide. También hemos construido muchos cromosomas que fallan a la hora del reparto, y en el proceso algo hemos aprendido sobre los factores que regulan la herencia cromosómica.

Nuestro interés por el comportamiento de los cromosomas no constituye mero capricho académico. La existencia de vida depende de la precisión de la transmisión genética que median los cromosomas. Los errores que se produzcan durante la distribución de éstos pueden tener consecuencias catastróficas. En su mayoría, las células que heredan un número equivocado de cromosomas mueren, y las que no mueren suelen presentar anormalidades. El síndrome de Down, por ejemplo, se debe a un error de la distribución cromosómica, que dota a las células del cuerpo de los afectados con una copia supernumeraria del cromosoma 21.

Los cromosomas artificiales podrían convertirse también en una valiosa herramienta para la ingeniería genética. Los métodos al uso para introducir ADN foráneo dentro de una célula no sirven para incorporar genes de gran tamaño o grupos de genes. Nuestros cromosomas artificiales sí lo permiten. Otros laboratorios han propagado ya con éxito genes humanos en células de levadura incluyéndolos en cromosomas artificiales.

Para construir cromosomas artificiales que funcionasen como los "naturales", debíamos manipular los elementos implicados en el comportamiento cromosómico. La materia prima de todos los cromosomas es una molécula de ADN de dos cadenas, arrolladas helicoidalmente, a modo de escalera de caracol. Las cadenas están formadas por las bases adenina (*A*), guanina (*G*), timina (*T*) y citosina (*C*). Las bases de una de las cadenas se emparejan con las de la cadena opuesta, manteniéndose así unidas las dos. El emparejamiento obedece a reglas muy estrictas: *A* se une siempre con *T* y *G* con *C*. Las cadenas son, por tanto, complementarias; de la secuencia de bases de una de ellas se deduce la de su compañera.

Así es como las células pueden duplicar sus series cromosómicas antes de la mitosis, o división celular. Durante la replicación del ADN, las dos cadenas de la doble hélice se separan y cada una de ellas actúa como molde, o guía, de la síntesis de una cadena complementaria. Se generan así dos cromosomas donde antes sólo había uno. Durante la mitosis, una estructura fusiforme formada por fibrillas muy finas que parten de los polos opuestos de las células en división tira de las dos "cromátidas hermanas", idénticas, separándolas. Esa segregación asegura que cada célula hija cuente con un juego completo de cromosomas una vez concluida la división celular.

Según se cree, tres son los elementos comosómicos necesarios para llevar a cabo la replicación y segregación. Uno es el origen de replicación, lugar del cromosoma donde comienza la síntesis de nuevo ADN. Por ser muy largos los cromosomas y muy lenta la replicación, hay en cada uno muchos orígenes de replicación y en la tarea de obtención de las cromátidas hermanas trabajan coordinadamente muchas enzimas. Otro elemento necesario para el buen funcionamiento del cromosoma es el centrómero, segmento de ADN donde se anclan las fibrillas durante la mitosis. El centrómero suele estar, aunque no siempre, en el centro del cromosoma. Finalmente, en ambos extremos del cromosoma debe haber ciertas secuencias de ADN repetitivo cuya función es impedir la degradación de los genes terminales; se trata de los telómeros (del griego *telos*, fin).

En este artículo expondremos los últimos avances de la interpretación del papel que se les supone a esos elementos en la correcta herencia de los cromosomas. La mayoría de los estudios se han realizado en levaduras, un organismo unicelular, fácilmente manipulable y que en muchos aspectos recuerda a las células de los organismos superiores. Los errores que tienen que ver con el mecanismo hereditario no suelen aparecer en las levaduras: sólo se dan en una de cada 100.000 divisiones celulares.

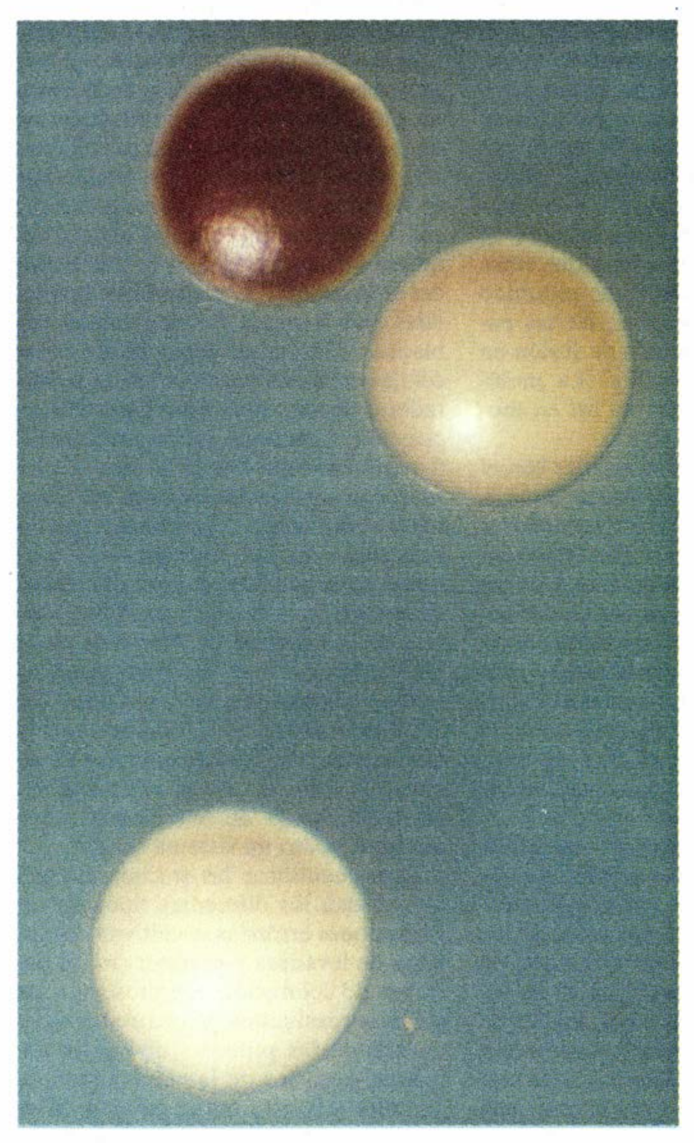
La levadura es también el único organismo conocido en el que centrómeros, telómeros y orígenes de replicación son segmentos cortos y bien definidos de la molécula de ADN. Las células de levadura poseen 16 cromoso-

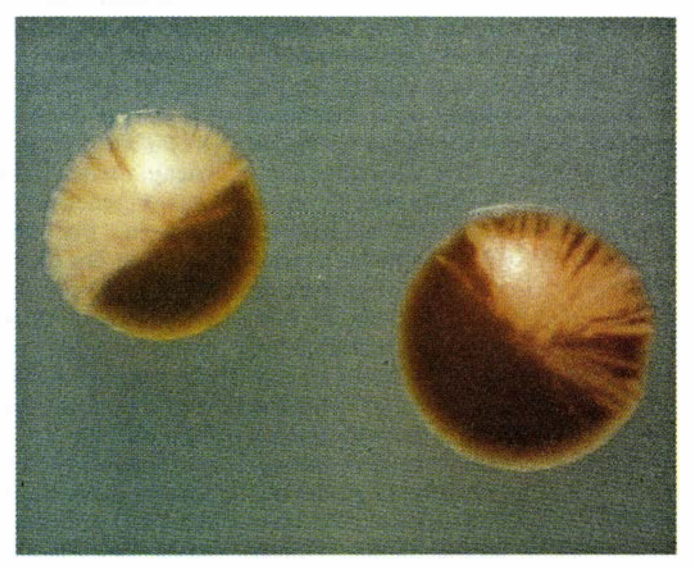
mas, cuyas longitudes van de los 300.000 a los más de dos millones de pares de bases. (Los cromosomas humanos son mucho más largos: su longitud media es de unos 100 millones de pares de bases.) La longitud de los elementos funcionales de los cromosomas de levaduras oscila entre 100 y 1000 pares de bases. En cambio, los centrómeros de otros organismos (y es mera suposición, pues es muy poco lo que se sabe de ellos) pueden alcanzar el millón de pares de bases.

¿Qué estrategia experimental utilizamos para trabajar con esos elementos cromosómicos? Comenzamos por clonar los orígenes de replicación. Hace ocho años, Kewin Struhl, Dan T. Stinchcomb, Stewart Scherer y Ronald W. Davis, todos ellos en la Universidad de Stanford por aquellas fechas, comprobaron que podía replicarse cualquier secuencia de ADN de levadura con total independencia de los cromosomas, si unían esas secuencias a otras prefijadas del ADN cromosómico de levaduras. Las secuencias de ADN que confieren la capacidad de replicación independiente son, probablemente, las mismas que actúan como orígenes de replicación en los cromosomas.

Las moléculas de ADN dotadas de capacidad para replicarse libremente se denominan plásmidos. En su mayoría, incluidos los que construyeron los investigadores de Stanford, son anulares, mientras que en los cromosomas predomina la forma lineal. Pese a su capacidad para replicarse, esos plásmidos no se comportan como cromosomas normales cuando llega la hora de la segregación. A menudo, las dos copias del plásmido quedan en la célula madre durante la mitosis; ese fenómeno refuerza la hipótesis según la cual se exige la presencia de otros elementos cromosómicos para dirigir la herencia de las moléculas de ADN, tras la replicación.

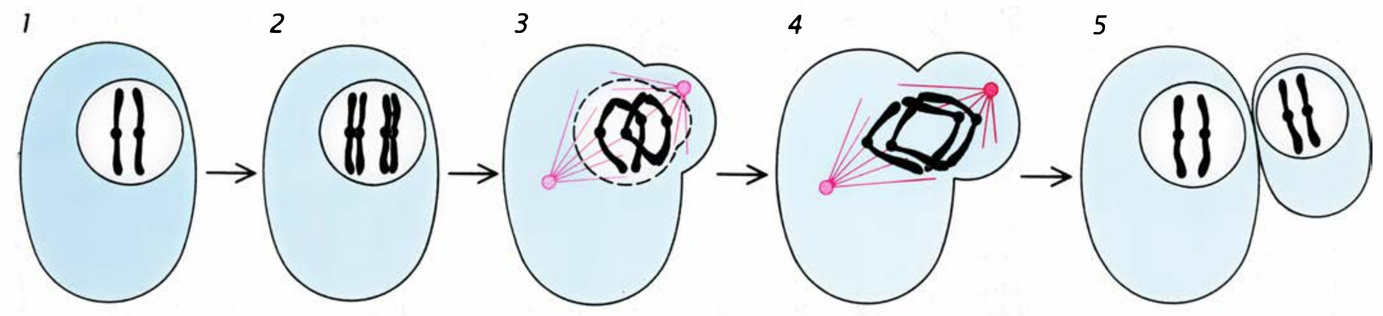
En 1980, Louise Clarke y John A. Carbon, de la Universidad de California en Santa Bárbara, clonaron el ADN correspondiente a uno de los centrómeros de levadura. Las secuencias centroméricas ejercen un notable efecto sobre los plásmidos donde se insertan: éstos se dividen correctamente en el 99 por ciento de las mitosis. Ya se han clonado y estudiado en detalle los centrómeros de 12 de los 16 cromosomas de levadura. Sus secuencias son muy similares. Parece que esas regiones constituyen el sitio donde se asen los microtúbulos, las tenues varillas que constituyen las fibrillas del







1. COLONIAS TRICOLORES DE LEVADURAS, que prueban la herencia de los cromosomas artificiales. Los cromosomas contienen un gen que inhibe la pigmentación; por ello, las células que portan una copia de dicho cromosoma son rosas; las que llevan dos copias, blancas y, las que no poseen ninguno, rojas. Cada colonia, formada por unos 10 millones de células, deriva de una célula ancestral. Si los cromosomas artificiales se reparten correctamente durante la división celular, todas las células de la colonia serán del mismo color (*izquierda*). En el caso de producirse errores se observarán sectores cromáticos (*derecha*).



2. MITOSIS, proceso mediante el cual una célula se divide en dos células hijas idénticas. Durante la mitosis, los cromosomas se replican y producen cromátidas hermanas (*1*, *2*), que se segregan en sendas células distintas (*3-5*). La segregación se lleva a cabo con la ayuda de una estructura fibrilar (*rojo*) que irradia desde los polos de la célula en división y tira de las cromátidas hermanas en sentidos opuestos. Las células fruto de la mitosis normal portan idéntica información.

huso. Los cromosomas carentes de centrómeros probablemente sean incapaces de unirse al huso mitótico, tendiendo a dividirse a lo sumo de modo aleatorio (esto es, la mitad de las veces las cromátidas hermanas se irán a células diferentes y la otra mitad se quedarán en una de las células).

Los telómeros fueron los últimos elementos cromosómicos de las levaduras que se clonaron. Su localización en los extremos impedía la manipulación por los métodos habitules de la ingeniería genética. Durante muchos años se han venido estudiando los telómeros naturales en cierto tipo de protozoos en los que tales estructuras abundan de modo particular. En 1982, uno de los autores (Szostak) y Elizabeth H. Blackburn, de la Universidad de California en Berkeley, pusieron a punto una técnica con la que, utilizando los telómeros de esos protozoos, se construía una molécula lineal de ADN capaz de replicarse en células de levadura. Poco después, mediante una adaptación de la misma técnica, clonamos los telómeros de levaduras. Casi al mismo tiempo, Ginger M. Dani y Virginia A. Zakian, del Centro Fred Hutchison de Investigación del Cáncer, de Seattle, dieron también pública cuenta de la clonación de telómeros de levadura.

Ante la necesidad de telómeros para asegurar la integridad de los cromosomas lineales en la célula, la clonación de aquéllos nos abría la vía para obtener un cromosoma artificial. Podían ya manipularse todos los elementos presumiblemente implicados en el control de la replicación y segregación cromosómica. Con ellos a nuestra disposición, la construcción resultaba tarea sencilla. En 1983 lográbamos nuestro primer cromosoma. Muy corto, constaba de sólo 11.000 pares de bases, es decir, menos del 5 por ciento de lo que mide el menor de los cromosomas naturales de las levaduras.

La fabricación de un cromosoma artificial es un proceso secuencial, cuyo punto de partida es un plásmido bacteriano de los habituales como vehículos de clonación. Se va cortando el plásmido con enzimas que crean "huecos" en la molécula de ADN; en éstos se introducen genes o alguno de los tres elementos cromosómicos. Optamos por insertar en primer lugar genes que confiriesen alguna cualidad diferencial a las células de levadura que portaran tales cromosomas. Esas señales, o marcadores genéticos, suelen dar color a las células de levadura, o permitir su crecimiento en ausencia de algún nutriente esencial. Seguidamente, añadimos orígenes de replicación y un centrómero. Por último, agregamos al plásmido dos telómeros fundidos entre sí. Cuando se introduce ese plásmido en una célula de levadura, ciertas enzimas escinden los puntos de fusión en dos telómeros funcionales. La molécula circular se transforma así en molécula lineal.

¿Qué pretendíamos averiguar con el análisis del comportamiento de los cromosomas artificiales? Buscábamos tres cosas. En primer lugar, queríamos saber si centrómeros, telómeros y orígenes de replicación eran las únicas secuencias de ADN especializadas que se requerían en el comportamiento cromosómico normal. En segundo lugar, esperábamos conocer algo más sobre el mecanismo mediante el cual el huso mitótico separa los cromosomas durante la división celular.

Finalmente, queríamos describir cómo se producían los errores de segregación, tanto en el caso de los cromosomas artificiales como en el de los naturales. Pueden darse dos tipos de segregaciones erróneas. Una es la denominada segregación 1 : 0, en la que una de las células hijas se queda con una copia del cromosoma y la otra con ninguna. Se produce ese error si, por alguna razón, el cromosoma no llega a replicarse, o si se degrada una de las cromátidas hermanas. El otro tipo de error, la segregación 2 : 0, ocurre cuando las dos copias del cromosoma van a parar a la misma célula hija. Los errores 2 : 0 se denominan también errores de no disyunción, pues las cromátidas hermanas no logran separarse durante la mitosis.

Existe un ensayo, basado en la coloración de las colonias de levaduras, que permite distinguir fácilmente esos dos tipos de errores. Al construir nuestro vehículo de ADN, ya fuese plásmido o cromosoma, incluíamos un gen que suprime la producción de un pigmento rojo fabricado por algunas estirpes de levaduras. Las células que no heredan el cromosoma conservan su color rojo natural, pero si alguna adquiere una copia del gen (y por tanto, del cromosoma) se vuelve rosa. Las células que heredan las dos copias son blancas. Supóngase que partimos con células de levaduras de color rosa, portadoras de una copia del cromosoma en cuestión. Una segregación errónea 2 : 0 producirá una célula blanca y otra roja; una segregación errónea 1 : 0 dará lugar a una célula rosa y otra roja. Finalmente, en las segregaciones normales se originarán dos células rosas. El ensayo lo desarrollaron Philip Hieter, de la Facultad de Medicina de la Universidad Johns Hopkins, y Carl Mann, Michael Snyder y Davis, de Stanford. Douglas Koshland, de la Universidad de California en San Francisco, y John C. Kent y Leland H. Hartwell, de la de Washington, han puesto a punto un sistema similar.

Para cuantificar las frecuencias con que se dan los diferentes tipos de segregaciones erróneas se cultivan células rosas de levadura y se observan los patrones de coloración que presentan las colonias resultantes. Si ocurre un error en una de las primeras divisiones celulares, la mitad de la colonia será de un color y la otra mitad de otro. Si se producen más errores en algunas de las divisiones posteriores, las colonias adquirirán un aspecto sectorizado, similar al de una tarta cortada en porciones de tres colores distintos. Los "tro-

zos" gruesos indican que ha ocurrido una segregación errónea muy al principio de la historia de la colonia, y que dicho error se ha perpetuado. Los sectores de color más finos evidencian errores más tardíos. En otras palabras, las colonias con pocas segregaciones erróneas poseen escasa segmentación, mientras que las colonias en las cuales se dan frecuentemente los errores están muy sectorizadas.

Utilizamos éste y otros ensayos para comparar con qué precisión se segregaban los plásmidos, los cromosomas artificiales y los cromosomas naturales. Nos sorprendió el comportamiento de nuestros cromosomas artificiales. A diferencia de los plásmidos anulares dotados de centrómeros, nuestros pequeños cromosomas lineales se dividían aleatoriamente. Tan inesperado resultado planteaba dos cuestiones: ¿por qué las moléculas lineales no se segregaban correctamente cuando sí lo hacían las anulares? ¿Qué cambios debían introducirse para que los cromosomas lineales artificiales se comportaran como los naturales?

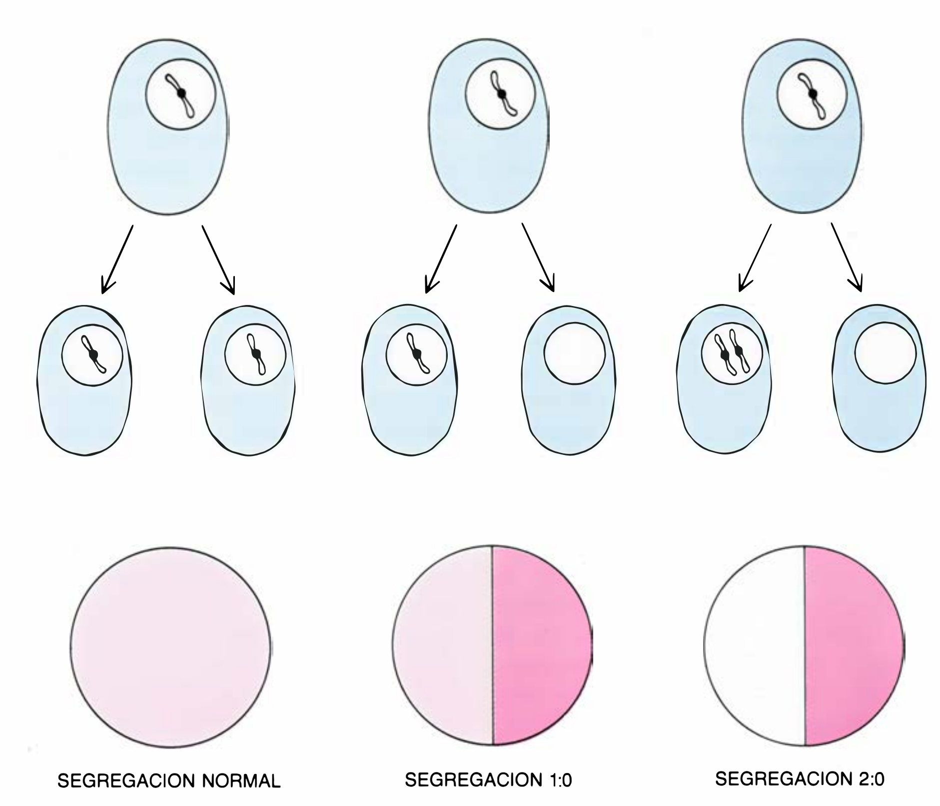
Repasamos algunas de las hipótesis que podían explicar la escasa precisión con que se dividían nuestros cromosomas artificiales. Pensamos primero que los culpables podían ser los telómeros, pues procedían de protozoos y no de levaduras, pero comprobamos que funcionaban exactamente igual que lo hacían los de levadura. Imaginamos luego que quizá los centrómeros hubieran sufrido algún daño durante la clonación. Estaban intactos. Por exclusión, la topología de la molécula lineal debía ser la responsable de las diferencias observadas entre los patrones de segregación. Aún siendo una versión breve de un cromosoma natural, nuestro cromosoma dividíase peor que su facsímil anular. ¿Tendría la culpa la propia longitud del cromosoma?

Para salir de dudas construimos un cromosoma artificial de 55.000 pares de bases. El ADN añadido procedía de un virus bacteriano, que utilizamos de fundamento para el cromosoma mayor; lo suponíamos inocuo para las levaduras. Por lo demás, la molécula era idéntica a nuestro cromosoma de 11.000 pares de bases.

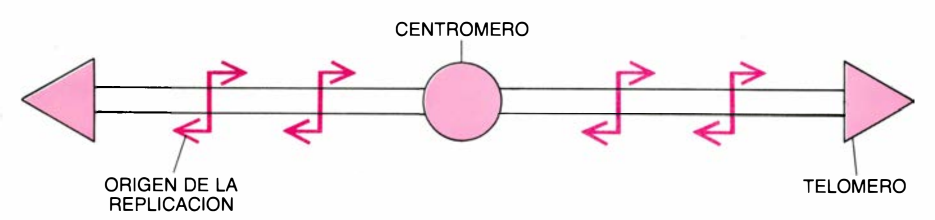
El cromosoma artificial más largo presentó segregaciones erróneas en sólo el 1,5 por ciento de las divisiones celulares; de ellas, un 90 por ciento se debía a pérdidas cromosómicas (segregaciones 1 : 0), y sólo un 10 por ciento a fenómenos de no disyunción (segregación 2 : 0). Esa frecuencia era todavía 1000 veces mayor que la obtenida con cromosomas naturales, pero cuando más adelante duplicamos la longitud del cromosoma hasta 104.000 pares de bases, la frecuencia de segregaciones erróneas se redujo al 0,3 por ciento. Hieter y sus colaboradores publicaron resultados semejantes, obtenidos en sus laboratorios. Los datos demostraban claramente que la longitud del cromosoma influía de modo decisivo en la precisión de la segregación.

¿Cuál podía ser la influencia de la longitud? Manejábamos dos opciones, en cierto modo parecidas. Una, la más verosímil, que la propia longitud de la molécula tuviese algo que ver con el mecanismo de segregación. Y la otra, que la distancia entre el centrómero y los extremos de la molécula, variable según la longitud del cromosoma, afectase a la segregación. Para verificar esta última hipótesis, modificamos la estructura de un cromosoma natural de levaduras, de forma que su centrómero, normalmente situado en el centro de la molécula, quedara situado hacia un extremo. La alteración sólo provocó una reducción limitada de la precisión: el cromosoma se segregaba todavía 10.000 veces mejor que el cromosoma artificial corto.

Todo apuntaba a que la longitud global constituía el factor determinante. Si así fuese, razonamos, los fragmentos de cromosomas naturales se comportarían durante la división celular tan mal como los cromosomas artificiales.



3. SEGREGACION CROMOSOMICA, que determina el color de las colonias de levaduras mostradas en la figura 1. En cada colonia, la célula fundadora posee una sola copia del cromosoma artificial, y es, por tanto, de color rosa. Si durante la mitosis ese cromosoma se replica y se segrega normalmente, las dos células hijas recibirán una copia y también serán rosas (*izquierda*). Pero a veces no se sintetiza, o se pierde, una de las cromátidas hermanas (*centro*). Esa segregación errónea 1 : 0 producirá una célula rosa y otra roja. Si no ocurren más errores durante las siguientes divisiones, la mitad de la colonia resultante será rosa y la otra mitad roja. En las segregaciones erróneas 2 : 0 (*derecha*) las dos copias del cromosoma van a la misma célula, que será blanca, mientras que su hermana será roja. De nuevo, si no ocurren más errores tras esa primera división, la colonia será bicolor. Si tales errores vuelven a ocurrir, se manifestarán en la presencia de segmentos cromáticos. En las fotografías de la figura 1 se muestran ejemplos de todas esas situaciones.



4. ELEMENTOS FUNCIONALES de los cromosomas; son secuencias de ADN especializadas, esenciales para la tarea que les cumple desempeñar a tales cromosomas. El centrómero es el sitio de anclaje de las fibras del huso. Los telómeros protegen a los extremos cromosómicos de una posible degradación. Los orígenes de replicación, por donde comienza la duplicación del ADN, se esparcen por todo el cromosoma.

Conseguimos dichos fragmentos y comprobamos que, en efecto, la precisión de su división disminuía cuando menguaba la longitud de los fragmentos. El efecto empezaba a ponerse de manifiesto a tamaños de entre 100.000 y 150.000 pares de bases.

La frecuencia total de segregaciones erróneas es menor, en fragmentos de longitud comparable, cuando proceden de cromosomas naturales que si son de cromosomas artificiales. En su mayor parte, esa diferencia se debe a la mayor incidencia de segregaciones erróneas del tipo 1 : 0 en los fragmentos artificiales, pues la frecuencia de errores 2 : 0 es similar. Según creemos, esos fallos no se producen durante la división celular, sino que tienen su origen en la replicación de los cromosomas artificiales. Parece, por tanto, que, para que la división se produzca correctamente, importa, más la longitud total del cromosoma que la alteración de alguna característica secundaria.

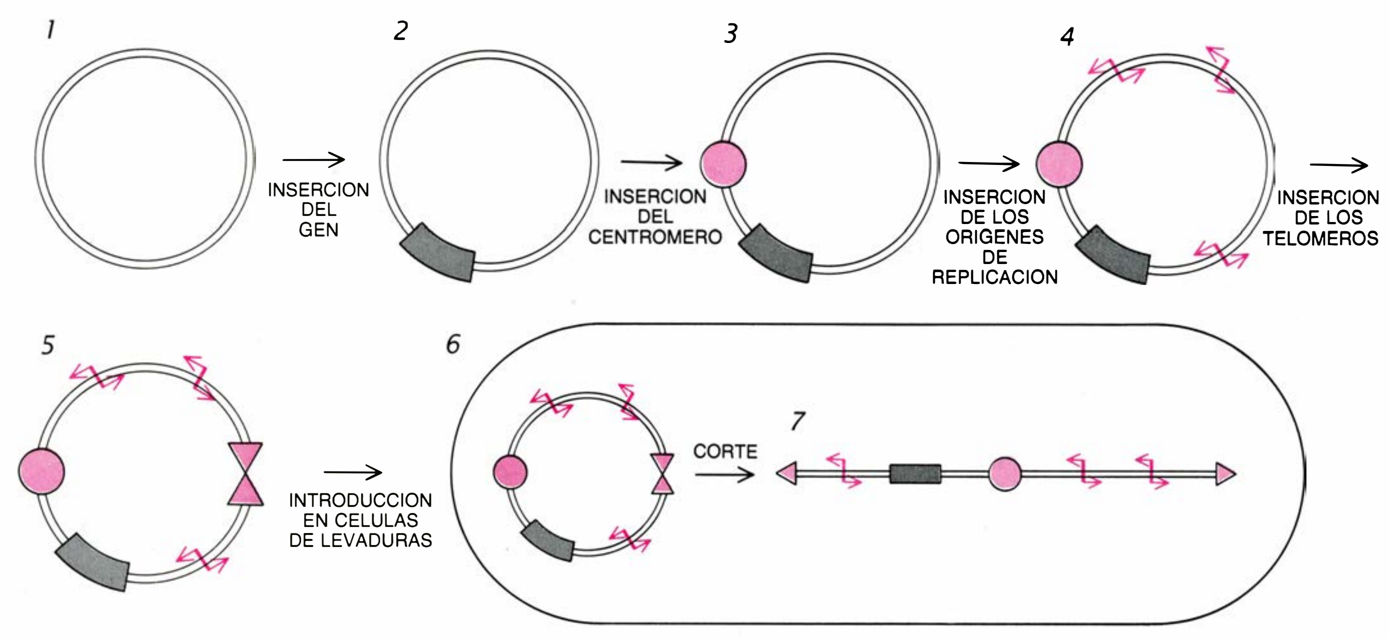
Hemos propuesto un modelo general para explicar los efectos de la longitud y topología sobre las propiedades de los cromosomas artificiales. El modelo se basa, en parte, en observaciones anteriores de otros investigadores sobre las fuerzas que controlan el movimiento cromosómico durante la división celular. En la década de 1960, R. Bruce Nicklas y sus colaboradores, de la Universidad de Duke, realizaron una serie de elegantes experimentos que demostraban que la unión del centrómero con las fibras del huso sólo es estable cuando está sometida a cierta tensión. En otras palabras, si no existe una fuerza que resista el tirón de las fibras, los centrómeros se desprenden del huso. La ligazón existente entre las cromátidas hermanas genera dicha fuerza.

Aunque nadie sabe a ciencia cierta qué mantiene juntas las dos cromátidas, hemos propuesto un modelo, hipotético aún. Pensamos que la ligazón se debe al entrelazamiento, o encadenamiento, de las dos dobles hélices de las cromátidas hermanas. El entrelazamiento se produce en muchos sitios a lo largo de las cromátidas durante la replicación, cuando la maquinaria de síntesis expulsa las enzimas supuestamente encargadas de mantener separadas las cadenas del ADN [*véase la figura 6*]. Durante la mitosis, las regiones con entrelazamiento ofrecerían resistencia a la separación y proporcionarían la fuerza que estabiliza la unión del centrómero con las fibras del huso. Más tarde, otra enzima facilitaría el desenrollamiento de las dos dobles hélices, lo que permitiría la separación de las cromátidas; ello probablemente sólo ocurriría cuando la unión entre el cromosoma y el huso mitótico se hubiera estabilizado suficientemente.

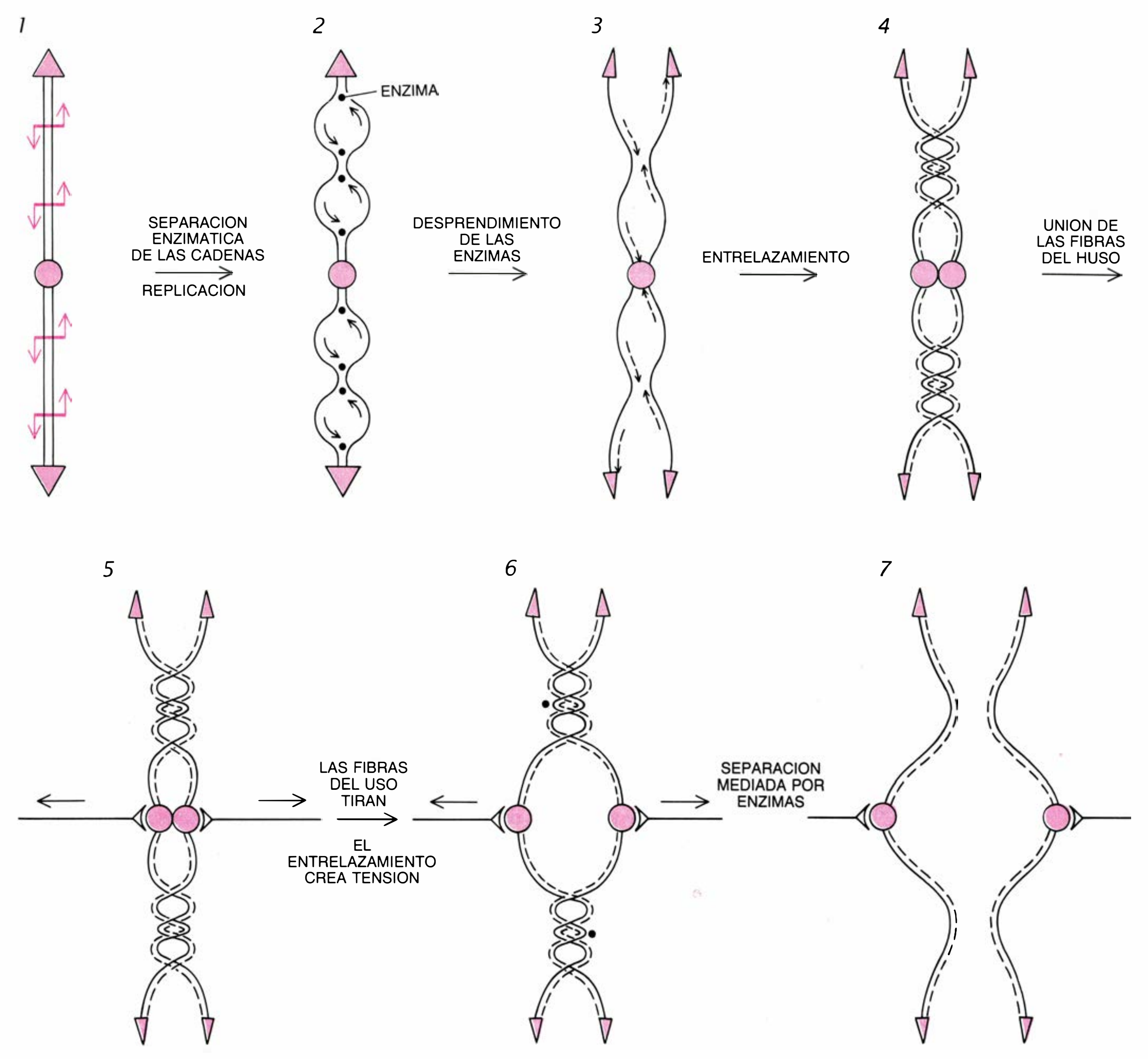
El entrelazamiento, como ligazón física operativa entre cromátidas hermanas, explica paladinamente nuestras observaciones sobre lo que ocurre en el caso de los cromosomas artificiales. Los plásmidos, al ser anulares, siempre forman dos moléculas hermanas, que se mantienen entrelazadas y no se dejan separar. No importa, por tanto, cuál sea el tamaño del plásmido, sus cromátidas hermanas resistirán la separación durante la mitosis. Por el contrario, puede liberarse el entrelazamiento entre una pareja de moléculas lineales sin más que girar una alrededor de la otra. Dos cromátidas lineales hermanas pueden desenredarse incluso en ausencia de actividad enzimática y, si están separadas, no se aportarán la mutua tensión necesaria para una correcta segregación.

Cuanto más corto sea el cromosoma, más fácil resultará que su cromátida hermana se desenrolle y menor será la probabilidad de una precisa segregación de las moléculas. De la misma manera, si un cromosoma no se replica, o si alguna de las cromátidas hermanas se pierde, la cromátida solitaria, que carece de compañera, no podrá unirse al huso mitótico. Ambas situaciones concuerdan con nuestras observaciones de segregaciones erróneas 1 : 0 y 2 : 0.

De nuestras investigaciones se desprendía también que las células deben tener mecanismos para comprobar el éxito de la segregación cromosómica. En este sentido hemos encontrado que, en las estirpes de levaduras que llevan un cromosoma artificial corto, muchas de las células en proceso de división presentan una morfología anormal. En esas divisiones, y antes de que se separen las dos células, la célula hija crece hasta alcanzar un tamaño similar al de la madre. En circunstancias normales, la célula hija se desprende de la madre cuando ha alcanzado un tamaño aproximadamente igual a la mitad del de ésta. Al examinar en aque-



5. CONSTRUCCION DE UN CROMOSOMA ARTIFICIAL a partir de un segmento anular de ADN, o plásmido, (*1*). Los autores insertaron un gen que altera la pigmentación celular (*2*). A continuación, añadieron, uno a uno, los elementos funcionales (*3*-*5*). Tras insertar dos telómeros fundidos, introdujeron el plásmido en una célula de levadura (*6*), donde adquiere la configuración lineal tras cortarse enzimáticamente por el sitio de fusión de los telómeros (*7*).



6. MODELO DE ENTRELAZAMIENTO que explicaría la resistencia de las cromátidas a la segregación. Durante la replicación cromosómica (*línea a trazos*) se produce el entrelazamiento. Cuando dos sitios de síntesis (*flechas*) se aproximan (*1-3*), se expulsan las enzimas celulares que desenrollan las cadenas en replicación, lo que permite que las cromátidas se entrelacen mutuamente (*4*). Cuando, en la división celular, las fibras del huso se unen (*5*) y comienzan a tirar, el entrelazamiento crea tensión (*6*). Otras enzimas cortan, transitoriamente, una de las cromátidas, posibilitando con ello la separación de éstas (*7*).

llas estirpes las divisiones celulares con segregaciones erróneas, observamos que en más del 90 por ciento se daba esa anomalía. Creemos que la morfología anormal de las células se debe a que han estado transitoriamente detenidas en mitosis. Las células detectan un fallo durante la segregación y retrasan la terminación de la mitosis, esperando que el problema se corrija por sí mismo. Mientras tanto, la célula hija prosigue su desarollo.

Los cromosomas artificiales se han demostrado de una gran ayuda en nuestras investigaciones sobre los factores que controlan el comportamiento cromosómico durante la mitosis. Y lo serán más cuando mejoren las técnicas para construirlos. Junto con otros investigadores, nos estamos sirviendo de cromosomas artificiales para estudiar la meiosis, un tipo de división celular del que, en los organismos superiores, resultan las células germinales (óvulos y espermatozoides). Esos estudios incrementarán nuestros conocimientos sobre las enfermedades genéticas que tienen su origen en algún trastorno de la herencia cromosómica, como es el caso del síndrome de Down.

David T. Burke, Georges F. Carle y Maynard V. Olson, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington, han construido ya cromosomas artificiales para clonar genes humanos en levaduras. Estos cromosomas son, en realidad, meros vehículos cuya función es guardar y multiplicar genes humanos, mientras se transfieren a otros tipos celulares para experimentar con ellos. Burke y sus colegas esperan que sus cromosomas artificiales porten genes de más de 50.000 pares de bases. Se cubriría así la necesidad de contar con un vehículo capaz de albergar a los grandes genes y agrupamientos génicos que desempeñan funciones importantes en la genética del hombre y otros animales. No es, pues, descabellado pensar que, algún día, los cromosomas artificiales proporcionen a los bioingenieros un nuevo grado de flexibilidad y control.

Ciencia y sociedad

Nobel de física 1987

Rara vez ha cumplido la Academia sueca de Ciencias en su concesión de los premios Nobel tan prestamente los deseos de su creador, esto es, reconocer aquellos descubrimientos que, a lo largo del año, hayan aportado el mayor beneficio a la humanidad, como, en esta ocasión, cuando ha distinguido a Johannes Georg Bednorz y Karl Alex Müller por el descubrimiento de la superconductividad a temperaturas relativamente elevadas en una nueva clase de cerámicas de óxidos de cobre. En abril del propio 1987 publicaron ambos físicos el trabajo que, 75 años después del hallazgo, por parte del físico holandés Heike Kamerlingh Onnes, de la conducción eléctrica sin pérdidas en el mercurio, recogía su revolucionario descubrimiento logrado en el transcurso del proyecto emprendido en 1983 en las dependencias del laboratorio de investigación que la IBM tiene en Rüschlikon, Zurich.

Los resultados del trabajo sorprendieron de modo especial debido al gran número de científicos del mundo entero que, con ahínco y desde hacía tiempo, se dedicaban en vano a la búsqueda de la superconducción a temperatura elevada. Durante más de 12 años, la temperatura de transición más alta alcanzada fue de 23,3 grados Kelvin, lograda en 1973 en láminas delgadas de niobio-germanio (Nb_3-Ge). Ese estancamiento de las investigaciones en los compuestos intermetálicos [*véase la figura 1*] animó al equipo de Rüschlikon, y a los de otros laboratorios, a centrar su atención en los óxidos metálicos.

Se conocían ya óxidos metálicos superconductores, pero sus temperaturas de transición eran extremadamente bajas; por ejemplo, la del óxido de estroncio y titanio ($SrTiO_3$) era, según se determinó en 1966, de 0,3 grados Kelvin; dopándolo con niobio, el equipo de Rüschlikon consiguió elevarla, en 1980, hasta los 0,7 grados Kelvin. En 1973 se descubrió para el óxido de litio y titanio una temperatura de salto de 13,7 grados Kelvin, todavía alejada de los valores máximos obtenidos con los compuestos intermetálicos. Por esa razón, varios científicos de prestigio en ese ámbito decidieron abandonar las investigaciones sobre los óxidos metálicos a mediados de la década de 1960.

En 1957, John Bardeen, Leon Cooper y John Schrieffer desarrollaron la principal línea teórica de búsqueda de nuevos materiales superconductores, conocida, por sus iniciales, como teoría BCS. En los metales superconductores, los electrones, portadores de la corriente eléctrica, forman los denominados pares de Cooper, de espines opuestos y momento angular orbital relativo nulo; se mueven por la red cristalina como bosones libres de rozamiento y posibilitan la conducción eléctrica sin pérdidas. La teoría BCS explica la formación de pares en los metales a partir del efecto recíproco entre electrones y fonones que, por mediación de la atracción entre los electrones y los iones con carga positiva de la red, genera, indirectamente, la atracción entre electrones.

Cuanto mayor resulte el acoplamiento entre los electrones y las vibraciones de la red (los fonones), tanto más elevada será la temperatura de salto. En los buenos conductores, ese acoplamiento es débil; de ahí que el cobre, por ejemplo, no sea superconductor. Radica en ese punto una de las razones fundamentales por las que se espera que los óxidos metálicos (malos conductores o incluso aislantes con un intenso acoplamiento entre electrones y fonones) superconduzcan con temperaturas de transición superiores a las de los metales.

La decisión de desarrollar en Rüschlikon a partir de 1983 un programa de investigación en busca de óxidos metálicos superconductores se apoyaba, asimismo, en la larga experiencia, de más de dos décadas, con que contaba el centro en el estudio de las transiciones ferroeléctricas en los óxidos. La elección de los compuestos se fundamentó en presupuestos teóricos muy detallados elaborados por otros grupos científicos (por ejemplo, en la amplificación del efecto recíproco entre electrones y fonones que se observa en ciertos óxidos metálicos por la formación de los denominados polarones). Pero no se observó superconducción en los experimentos realizados con varios óxidos de níquel; por fin, a finales del verano de 1985, Bednorz y Müller centraron sus trabajos en los compuestos de óxidos de cobre.

La búsqueda de compuestos apropiados que contuvieran cobre di- y trivalente condujo al óxido de bario, lantanio y cobre. Ese quebradizo material cerámico, que a temperatura ambiente y superior se comporta como un metal, había sido ya estudiado minuciosamente a lo largo de 1984 y 1985 por científicos franceses, que, sin embargo, no analizaron sus propiedades superconductoras. En Rüschlikon se prepararon muestras de la cerámica en forma de canillas sometiendo el material a presiones de 4 kilobar y caldeándolo hasta los 900 grados Celsius. Seguidamente se midió la resistencia, en función de la temperatura, al paso de intensidades de corriente de entre 0,25 y 0,5 ampère por centímetro cuadrado [*véase la figura 1*]. A temperaturas elevadas, el comportamiento metálico resulta claro: la resistencia crece casi de forma lineal con la temperatura.

A temperaturas bajas, la resistencia primero crece; luego, según se acentúa la refrigeración, cae abruptamente más de tres órdenes de magnitud, hasta resultar inferior a la sensibilidad del aparato de medida, signo inequívoco de que se ha alcanzado la superconducción. Variando el contenido de bario y los procedimientos de fabricación, Bednorz y Müller lograron desplazar el inicio de la caída de la resistencia hasta los 35 grados Kelvin. En un trabajo realizado en Rüschlikon se comprobó inmediatamente la presencia de diamagnetismo, característica de la superconducción: se abría con ello el camino hacia los superconductores de altas temperaturas.

A principios del otoño de 1986, el hallazgo fue confirmado por equipos de investigación de la Universidad de Tokyo, de los Estados Unidos y de China. No tardó en desencadenarse una frenética y fructífera búsqueda de óxidos metálicos modificados dotados de temperaturas de transición cada vez superiores [*véase la figura 1*], violándose en parte las reglas que convencionalmente rigen la publicación de los trabajos científicos, pues las nuevas marcas aparecían mucho antes en la prensa diaria que en las revistas especializadas. La relativa sencillez de los procedimientos de obtención de las nuevas substancias permitió que también participaran en la lid los laboratorios pequeños.

Con un procedimiento especial de preparación de óxido de itrio, bario y cobre, el grupo de C. W. Chu, de la Universidad de Houston, logró superar, en la primavera de 1987, la frontera mágica de los 77,4 grados Kelvin, el punto de ebullición del nitrógeno líquido. Para refrigerar aquel material no se precisaría ya helio líquido, extraordinariamente caro, circunstancia que explica la enorme trascendencia

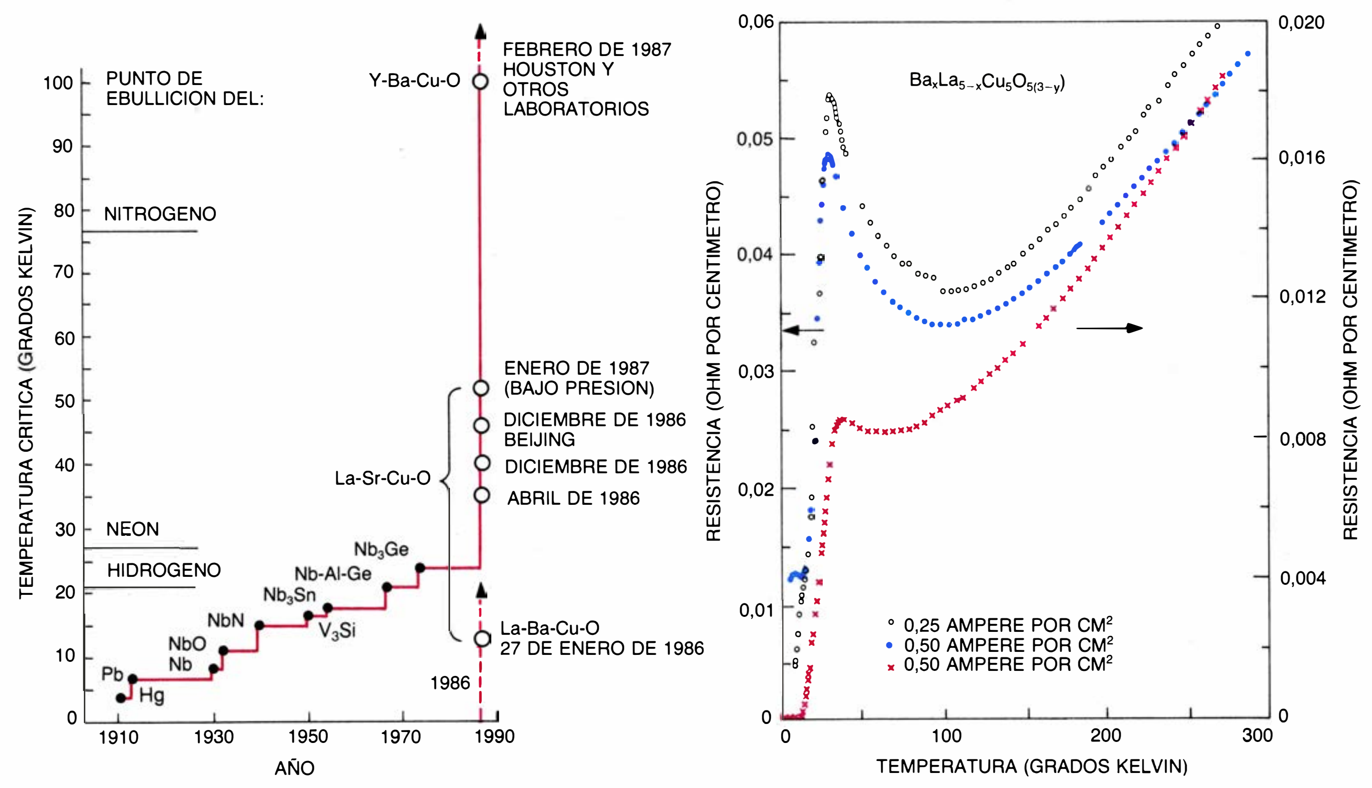
del hallazgo, por sus múltiples posibilidades de aplicación, así como el interés que ha suscitado en ámbitos como el de la industria, la administración científica y la política. En la actualidad, las temperaturas de transición de materiales cerámicos estables (aunque quebradizos) se sitúan claramente por encima de los 90 grados Kelvin; se aventura la obtención de superconductores estables a temperatura ambiente, pero ese logro no está asegurado.

Sin embargo, al avance científico no le importan tanto las diversas marcas logradas cuanto los progresos efectuados en el conocimiento básico, entre los que se cuentan las aportaciones de Müller y Bednorz. En el caso de los superconductores cerámicos, de temperaturas de salto inesperadamente elevadas, esos progresos han desencadenado un alud investigador probablemente sin parangón en la historia de la ciencia; no obstante, queda todavía por hilvanar una explicación teórica convincente y determinarse las verdaderas dimensiones de sus aplicaciones.

Resulta problemático aplicar directamente a los nuevos superconductores la teoría BCS, razón por la cual se están sometiendo a discusión diversas mejoras y adiciones teóricas. En todo caso, se coincide en que la estructura cuasi bidimensional de la red cristalina determina de modo destacado las características superconductoras —de forma análoga a la influencia que ejercen los gases electrónicos bidimensionales en el efecto Hall cuántico. Deriva de ello, entre otras, una anisotropía del material superconductor respecto de las intensidades de corriente e intensidades del flujo magnético críticas a las que cae la superconducción, efecto, ése, que resultaría especialmente preocupante en las futuras aplicaciones del material, por ejemplo, en la fabricación de imanes.

Sí se ha comprobado experimentalmente que en las nuevas cerámicas la superconducción corre a cargo de pares de Cooper; sin embargo, a diferencia de lo que se había observado en los materiales superconductores descubiertos hasta ahora, en este caso no se trata de electrones superconductores, sino de agujeros. En los electrones de los pares de Cooper de los metales, la distancia promedio es de unos 100 nanómetros; en los nuevos materiales, la denominada longitud de coherencia es inferior al tamaño de la celdilla elemental (de alrededor de 1,2 nanómetros): se trata de un efecto de importancia que, como otros muchos, aguarda aún su explicación satisfactoria.

El descubrimiento de Karl Alex Müller, de Basilea (becario IBM y profesor del politécnico de Zurich) y Johannes Georg Bednorz, de Neuenkirchen, República Federal de Alemania, (quien, como Müller, pero 24 años después, se formó también en el politécnico de Zurich), abre el camino a numerosos trabajos de investigación. Por otro lado, y de lograrase la fabricación de cables e imanes a partir de las quebradizas cerámicas superconductoras, son múltiples las aplicaciones que podrá dárseles en el futuro a los superconductores de alta temperatura. Verbigracia: en imanes para sistemas de control del tráfico; en tomografía de resonancia de espín o aceleradores de partículas; en el interferómetro cuántico (para la detección de ondas gravitatorias); en detectores de microondas; en instalaciones de cálculo digital y en cables para el transporte de energía a gran distancia sin pérdidas.



*1. DESARROLLO DE LA TEMPERATURA CRITICA de transición hacia la superconducción en diversos materiales (**izquierda**). En 1911, Heike Kamerlingh Onnes descubrió la conducción de corriente sin pérdidas en el mercurio (cuya temperatura de transición es de 4,1 grados Kelvin). Hasta el hallazgo, obra de K. Alex Müller y J. Georg Bednorz, de la superconducción en los óxidos metálicos cerámicos, el material de temperatura de transición más elevada conocido había sido el compuesto de niobio y germanio. A partir de entonces se registra un ascenso vertiginoso hacia temperaturas de salto superiores. A la derecha se muestra la desaparición de la resistencia a bajas temperaturas en una preparación especial de óxido de bario, lantano y cobre, representada tal como la midieron por primera vez Bednorz y Müller en 1986. Las dos curvas superiores se leen en la escala izquierda, donde x (bario) = 1; la inferior se lee en la derecha, donde x = 0,75.*

Como es el caso de otros progresos de la ciencia básica, los usos que puedan hacerse de estos avances son de doble filo. Se prevé el interés de las organizaciones que fomentan el desarrollo armamentístico o participan en él por aprovechar el hallazgo. Sin embargo, las posibilidades son hoy relativamente limitadas; a la luz de los conocimientos actuales ninguna sombra debe caer sobre los descubridores. (Georg Wolschin.)

Nobel de química 1987

Al premiar a Charles J. Pedersen, Jean-Marie Lehn y Donald J. Cram, el Comité Nobel ha galardonado a los tres representantes principales de un campo que incide prácticamente en todos los ámbitos de la química, y que alcanza incluso la farmacia, la medicina y, desde ayer mismo, la propia física de partículas. Su mejor descripción quizá sea la acuñada por Cram: química del hospedador y el hospedado.

Cosa excepcional, la fecha de nacimiento de esta disciplina puede fijarse con exactitud. A principios de la década de 1960, Pedersen trabajaba en el departamento de investigación sobre elastómeros de la empresa norteamericana DuPont, en particular, sobre la fabricación de gomas sintéticas. El 5 de julio de 1962 provocó una reacción entre dos compuestos, uno de los cuales no era del todo puro. La substancia contaminante formó cristales incoloros y sedosos de extrañas propiedades: prácticamente insolubles en metanol, se disolvían de inmediato al añadir sales de sodio. Lo paradójico era que la sal sódica que se añadía se disolvía mal en metanol.

El mérito de Pedersen consiste en haber advertido inmediatamente la causa y el alcance de tan poco llamativa observación. Sin proponérselo, había sintetizado una molécula anular dotada de protuberancias uniformes que acogían átomos de oxígeno. Comprendió al punto que el ión de sodio de la sal "había caído en el hueco central de la molécula"; la oquedad presentaba el tamaño justo para dar cabida al sodio y proporcionaba, desde la perspectiva química, un entorno en el que el ion debía encontrarse bastante confortable.

Pedersen bautizó "corona" a ese nuevo compuesto, pues "tal era el aspecto del modelo de la molécula y porque permitía dotar y desposeer de ese regio atributo a los cationes, sin que ni éstos ni aquélla sufrieran daño, como ocurre con las cabezas de sus altezas". La corona de Pedersen constituía la primera molécula neutra que formaba un compuesto estable con el ion de un metal alcalino.

A lo largo del lustro siguiente, Pedersen sintetizó y sometió a análisis otros compuestos parecidos; por fin, en 1967, informó sobre la nueva clase de substancias en un extenso trabajo aparecido en el *Journal of the American Chemical Society*.

En las investigaciones subsiguientes realizadas en esa joven rama de la química intervinieron de modo decisivo los otros dos galardonados. Así, en 1969, Lehn recubrió la corona con otro anillo y obtuvo una especie de jaula, que encerraba con mayor fuerza los iones que podían alojarse en su interior. También se sintetizaron moléculas que, sin tener los brazos cerrados en anillo, forman una trama en torno a los iones y los sujetan tenazmente. Fritz Vögtle sumó en 1974 esas estructuras al arsenal de las "hospedadoras".

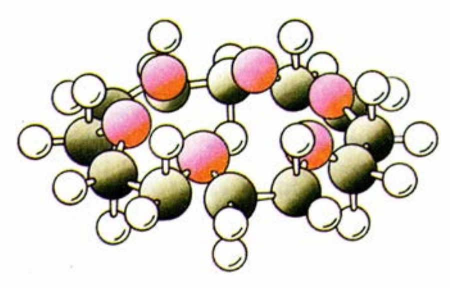
La característica general de esos compuestos es que poseen, o pueden formar, un hueco polar capaz de acoger un "huésped" polar, manteniendo su exterior apolar. Eso, y la posibilidad de ajustar el hueco al tamaño y las "necesidades" de un ion o grupo de átomos en particular, les dota de importancia sin par. Gracias a esas dos propiedades, pueden sumergirse de modo específico y selectivo en disolventes muy apolares, como el benzol o el cloroformo, substancias que sólo se disuelven en medios polares, como el agua. Ello posibilita, por ejemplo, la separación fácil y con fines analíticos de materias muy semejantes, como los iones de sodio y potasio. Igualmente, pueden disponerse en entornos apolares medios oxidativos, como el permanganato potásico, que sólo resultan solubles en entornos polares; junto al potasio, se trasladaría al disolvente orgánico el ion permanganato.

Ese embutido forzado del ion contrario se ha demostrado de gran utilidad en otras reacciones orgánicas. En su entorno natural, el ion se encuentra rodeado de moléculas polares de disolvente, que le apartan del reactivo con el que debe interactuar. En la fase orgánica, en cambio, se presenta desnudo, lo que suele incrementar varios órdenes de magnitud su facilidad de reacción. Lo más atractivo de esos compuestos, al menos a los ojos de quienes no son químicos, es, sin embargo, que remedan, en su conducta y sus cualidades, a muchas substancias complejas que desempeñan papeles de gran importancia en los sistemas biológicos. En particular ello es así, por un lado, por su afinidad selectiva hacia determinados iones alcalinos y alcalinotérreos y, por otro, por su capacidad de acarrear iones a través de membranas biológicas, igual que ciertos ionóforos naturales.

Gracias a ello se pueden diseñar modelos sencillos para simular y estudiar procesos biológicos complejos. En particular, Cram y Lehn se han dedicado durante la última década a analizar las características que deben satisfacer los huecos para desempeñar tareas tan complejas como las propias de los sitios de unión de enzimas, receptores o canales iónicos. Enfrascados en una verdadera orfebrería molecular, han creado estructuras "hospedadoras" cada vez más refinadas y fantásticas que, por ejemplo, distinguen un isótopo de otro o discriminan entre moléculas que sólo difieren por presentar simetría especular. Se entenderá que Lehn hable de supermoléculas o de química supramolecular.

La importancia clínica de la nueva clase de moléculas reside, sobretodo, en la posibilidad de construir con ellas electrodos sensibles a los iones, que permitirían determinar con rapidez y sencillez los niveles iónicos de los fluidos corporales, en particular el suero sanguíneo, y reseguir su evolución. Igualmente, moléculas "hospedadoras" talladas a la medida oportuna facilitarían la eliminación rápida y eficaz del organismo de iones de metales pesados tóxicos o de elementos radiactivos; hasta la fecha ello sólo se ha ensayado en experimentos con animales.

Hijo de noruegos, Pedersen nació en 1904 en Corea y en 1953 adoptó la nacionalidad norteamericana. Tras formarse en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, en 1927 se incorporó a la empresa química DuPont, para la que trabajó hasta 1969. Lehn, que nació en 1939 en Rosheim, Alsacia, ha enseñado química en la Universidad de Estrasburgo desde 1970 hasta 1979; desde ese año se encuentra en el Co-



*2. ETER "CORONADO", formado por un anillo de carbonos (**negro**) y átomos de hidrógeno (**blanco**) del que se proyectan átomos de oxígeno (**color**).*

legio de Francia, de París. Cram, nacido en 1919, se licenció en 1947 por la Universidad de Harvard y desde entonces es profesor de la Universidad de California en Los Angeles. (Gerhard Trageser.)

Nobel de medicina 1987

Por sus revolucionarias aportaciones al conocimiento de la organización de los genes de los anticuerpos se le ha concedido la última edición del premio Nobel de medicina y fisiología al japonés Susumo Tonegawa, quien ha logrado resolver uno de los mayores enigmas que presentaba el sistema inmunológico: la ingente variedad de los anticuerpos.

Nuestro organismo está capacitado para fabricar millones de anticuerpos distintos, que reconocen las estructuras ajenas a él y las neutralizan. No resulta concebible que posea genes para todos esos anticuerpos, pues se superaría varias veces la capacidad de nuestro material hereditario, cifrado en varios centenares de miles o un millón de genes, y ello sin contar las instrucciones de fabricación y operación de las restantes porciones del cuerpo.

Tonegawa, que cuenta 48 años, se interesó por el problema de la diversidad de los anticuerpos gracias a una afortunada circunstancia. Tras estudiar bioquímica en Japón y biología en los Estados Unidos, se había especializado en los virus, en particular en la transcripción del ADN en ARN mensajero, que traslada la información genética hacia su traducción en proteínas, que son cadenas de aminoácidos. Al caducar su permiso de residencia en los Estados Unidos, en 1971, se marchó al Instituto de Inmunología de Basilea, de la empresa farmacéutica Hoffmann-La Roche. Niels Jerne, que dirigía el instituto (y al que se le concedió el premio Nobel de 1984), le introdujo en el debate sobre la diversidad de los anticuerpos.

Se sabía entonces que las moléculas de anticuerpo están formadas por dos cadenas largas idénticas y otras dos cortas, también idénticas entre sí, y que ambos tipos presentan una región constante y otra variable. Existen cinco tipos principales de cadenas largas, o pesadas, y sólo dos tipos de cadenas ligeras. Todos los miembros de una misma clase presentan regiones constantes prácticamente idénticas. Los anticuerpos contra distintos agentes foráneos difieren en sus regiones variables.

Hallazgos anteriores apuntaban que las regiones constantes estaban determinadas por un gen, o a lo sumo por unos pocos, cada una. Se discutía, sin embargo, si los genes que debían codificar las regiones variables venían dados ya en la célula germinal o, como intuía Jerne, si ésta sólo poseía una dotación mucho menor que, posteriormente, en las células productoras de anticuerpos, mutaría de manera importante, quizá produciendo nuevas combinaciones por medio de reordenaciones. Gerald Edelman, premio Nobel 1972, había sugerido anteriormente un mecanismo recombinante de ese tipo, que explicaría, de paso, por qué el gen constante, a ser posible único, estaba capacitado para unirse en cualquier secuencia variable. Sin embargo, no existían precedentes de esa recombinación [véase "Bases genéticas de la diversidad de anticuerpos"por Philip Leder; Investigación y Ciencia, julio de 1982].

Tonegawa aplicó los métodos de la ingeniería genética, entonces novedosos, y logró clonar y analizar un gen de anticuerpo. Descubrió en primer lugar, para una de las cadenas ligeras, que la diversidad de los anticuerpos derivaba de un repertorio de genes bastante exiguo, de localización dispersa, que podían unirse en cualquier combinación. Las posibles combinaciones génicas se verían aumentadas por la presencia de varios genes "enlazantes". Por recombinación, se definiría una región variable, que se acoplaría a un gen constante.

El análisis genético de las demás cadenas, en el que participaron también otros grupos, amplió el cuadro. La diversidad de las cadenas pesadas se ve aumentada ulteriormente de modo notable por la intervención de "genes multiplicadores". Por otra parte, en la unión entre los genes de enlace y el variable se registran "imprecisiones" que modifican ligeramente el texto genético. Finalmente, la diversidad se amplía aún más por la incidencia de mutaciones en los centros activos de las regiones variables. La tasa de mutación centuplica, en esos lugares, la de los genes que no determinan anticuerpos, hasta el punto de que, por término medio, en cada división celular una de las células hijas porta una mutación.

En el hombre en particular, la más común de las cadenas ligeras presenta alrededor de 150 genes variables y cinco genes de enlace, es decir, 750 posibles combinaciones, que se multiplican por diez debido a lo impreciso de las uniones. En el caso de la cadena pesada, la diversidad la aportan unos 80 genes variables, seis genes de enlace y 50 especiales, que rinden 24.000 posibilidades; las "imprecisiones" centuplican la cifra. Esos 2,4 millones, combi-

nados con las 7500 variantes de la cadena ligera se traducen en 18.000 millones de anticuerpos distintos; ¡y todo ello a partir de sólo unos 300 elementos distintos del ADN embrionario!

La verdadera especificidad de una molécula de anticuerpo depende de modo decisivo de sus regiones hipervariables (los centros de mutación y los lugares donde se registran las uniones imprecisas). Las cadenas se pliegan de tal modo que esas regiones configuran un centro de unión. De ese modo, a partir de una dotación limitada, nuestro sistema inmunológico puede elaborar millones de anticuerpos capaces de reconocer, cada uno de ellos, una estructura foránea distinta.

Los genes constantes, en cuyo conocimiento también participó Tonegawa, no aportan variantes a esas posibilidades de reconocimiento. Determinan la clase a la que pertenecen los anticuerpos, es decir, la tarea que les corresponde desempeñar: por ejemplo, unirse a las sustancias extrañas que haya en la sangre o marcar las células que hayan sido infectadas.

Las células sintetizadoras de anticuerpos, las denominadas células *B*, modifican, a lo largo de su desarrollo y maduración, la clase de anticuerpos que liberan. De esa conmutación, que se realiza también por recombinación, son responsables ciertas secuencias del ADN, algunas de las cuales ha rastreado también Tonegawa.

Desde hace algunos años, el científico japonés, que a partir de 1981 colabora con el centro oncológico del Instituto de Tecnología de Massachusetts, investiga el segundo pilar del sistema inmunológico, las células *T*, que portan un receptor codificado en el ADN de forma similar a los anticuerpos. Esos receptores tienen encomendada la distinción, vital, entre lo "propio" y lo "foráneo". (Inge Hoefer.)

Otros premios 1987

La fundación Balzan, italosuiza, quiere llevar el reconocimiento a quienes no entran en los límites estrechos de los campos de la ciencia que cubren los premios Nobel. En su edición de 1987 ha concedido los siguientes: el de antropología física, al sudafricano Philip Tobias por sus aportaciones al estudio de los primeros homínidos; el de psicología, a Jerome Bruner, abierto discrepante del conductismo y uno de los principales promotores de la psicología cognitiva, para quien la cultura y el mundo de valores que el niño va elaborando reflejan los del medio donde se desarrolla; el de historia medieval, por último, a Sir Richard Southern, especialista en el desarrollo intelectual y religioso de la Edad Media.

Japón ha entrado con pie firme en la coronación de la labor investigadora propia y ajena. Tres fundaciones, la Kyoto, Honda y la Nacional de Biología, dan el "toque oriental" en esa lotería de premios. Kyoto, por ejemplo, recompensa a los científicos que se muestran "sensibles ante la falibilidad humana y poseen una honda reverencia por el espíritu universal". Los afortunados han sido Jan Hendrick Oort, holandés especialista en la estructura y dinámica galácticas, y Morris Cohen, norteamericano experto en el desarrollo de nuevos materiales.

La compañía Honda, por su lado, prima a los que fomentan la "ecotecnología", es decir, a quienes "armonizan el entorno general de la actividad humana". Diez millones de yenes se ha embolsado por esa razón Jean Dausset, Nobel de medicina de 1980 y creador del grupo "Movimiento Universal por la Responsabilidad de los Científicos". El premio Nacional de Biología se lo han otorgado a John Bertrand Gurdon, de Cambridge, por algo quizá más prosaico: la posibilidad de clonar huevos de *Xenopus*, un anfibio.

Radiación de sincrotrón

Un haz filamentoso de electrones vibra a través de una hilera de imanes de un anillo de almacenamiento y produce la luz ultravioleta y los rayos X más intensos del mundo. Esa radiación abre una nueva era para la ciencia

Herman Winick

Veinte años atrás no había más de cincuenta personas en todo el mundo que aprovecharan una clase peculiar de radiación electromagnética generada en aceleradores circulares de electrones. La radiación, intensa y altamente polarizada, contiene un amplio espectro continuo de longitudes de onda. A pesar de ello, por aquel entonces se consideraba en general como un engorro, pues representaba una "pérdida" de energía que hacía difícil y costoso impulsar los electrones a energías cada vez mayores. Quienes recurrían a ella debían realizar sus investigaciones en programas "parásitos", que utilizaban cualquier radiación generada en los experimentos de física de partículas elementales.

Las cosas han cambiado. La radiación de sincrotrón, de ella se trata, constituye hoy un recurso científico y tecnológico único. Cubre longitudes de onda que van desde el infrarrojo hasta las regiones de rayos gamma del espectro electromagnético; es, con mucho, la radiación continua más potente en las regiones espectrales ocupadas por la luz de vacío ultravioleta (VUV) (así llamada porque sólo en el vacío se propaga hasta distancias significativas) y los rayos X. Dicha radiación presenta una ventaja adicional: es pulsante, colimada y parcialmente coherente. El hecho de que todas estas propiedades se encuentren en la radiación de una misma fuente convierte a la radiación de sincrotrón en un instrumento de análisis muy versátil para la investigación básica y aplicada en física, química, biología y sus múltiples ramificaciones.

La utilidad de la radiación de sincrotrón no se limita al laboratorio. La posibilidad de seleccionar ciertas longitudes de onda de rayos X de una fuente continua permite construir radiografías "sintonizadas" de ciertos elementos, proceso que puede aplicarse con éxito en la representación de los vasos sanguíneos, por ejemplo. Además, la intensa radiación X producida en los dispositivos de radiación de sincrotrón sirve para grabar elementos de circuitos integrados que sean menores que la longitud de onda de la luz visible.

Ante las muchas aplicaciones actuales y potenciales de la radiación, a nadie sorprenderá que los aceleradores circulares de electrones, tales como los sincrotrones (máquinas que, en un intervalo temporal muy breve, aceleran haces de electrones hasta altas energías) y los anillos de almacenamiento (máquinas que mantienen un haz de electrones de alta energía circulando durante horas), funcionen plena o parcialmente como fuentes de radiación de sincrotrón y de ello se aprovechen más de 5000 investigadores de todo el mundo. Los "parásitos" de la radiación de sincrotrón han consumido, en muchos casos, a su huésped. Y un número creciente de científicos e ingenieros de la universidad, laboratorios públicos e industria privada, necesita mayor acceso a una radiación de sincrotrón de intensidad incluso superior para proseguir su trabajo.

Se está cubriendo la demanda en los centros existentes mediante la apertura de nuevas líneas de haz, que canalizan la radiación desde el anillo de almacenamiento hacia las estaciones experimentales, y la instalación de vibradores magnéticos y onduladores que incrementan la intensidad de la radiación hasta valores altísimos. Además, se están construyendo en distintas partes del mundo nuevas fuentes de radiación de sincrotrón, desde superconductores que caben en una sala espaciosa hasta anillos de almacenamiento de un kilómetro de circunferencia, que servirán a miles de usuarios.

Aunque los centros de radiación de sincrotrón sean bastante grandes, las estaciones experimentales situadas en los extremos de las líneas de haz se parecen a las instalaciones que se encuentran en los laboratorios pequeños. Así, las instalaciones centrales pueden subvenir a las necesidades de muchos grupos de investigación de "ciencia pequeña". Un grupo de esos suele constar de tres a cinco investigadores, que pueden realizar una medida interesante aproximadamente en una semana con una estación terminal cuyo coste no llega a los 100.000 dólares.

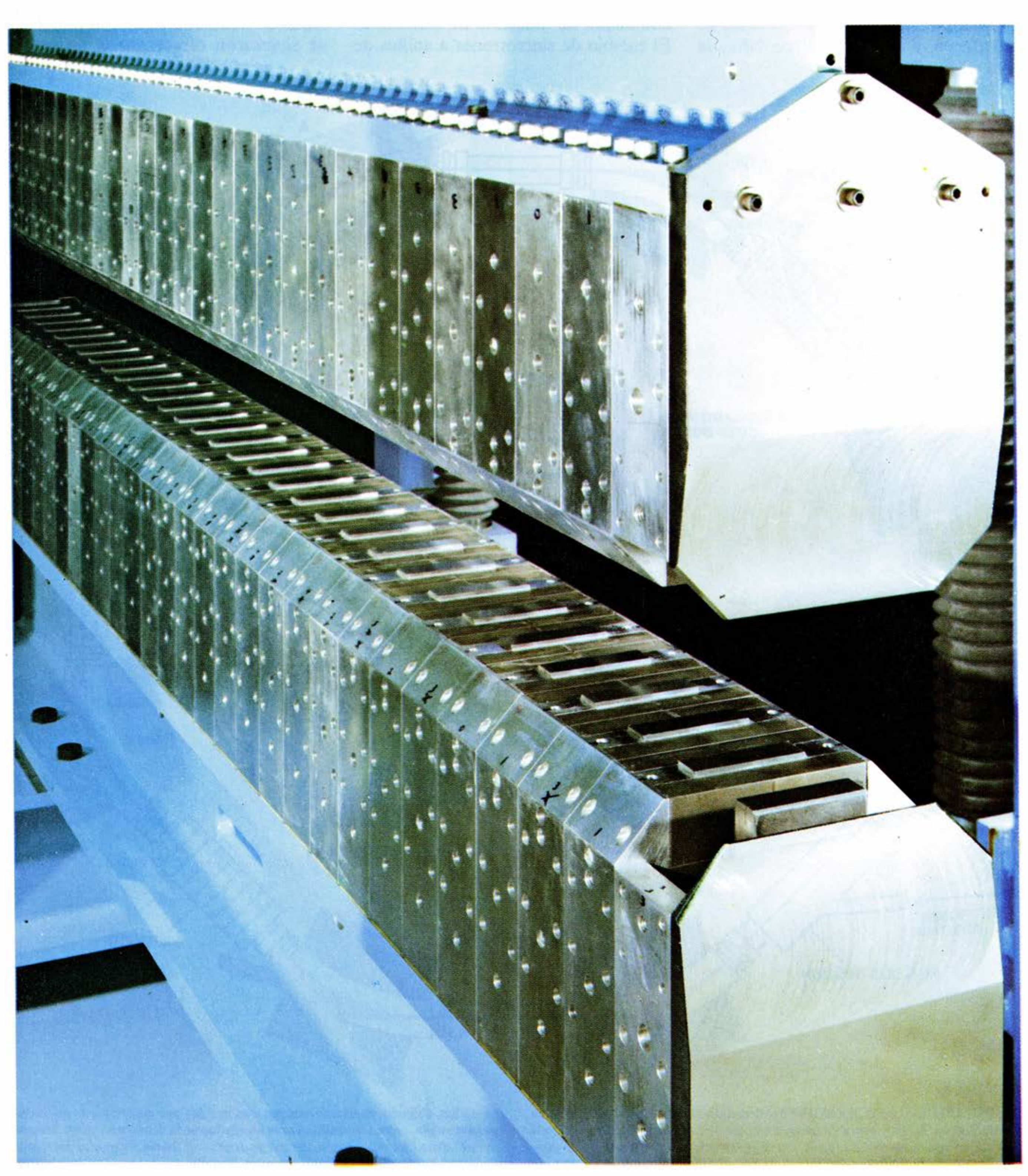
Generación de la radiación

Cuando una partícula cargada se acelera (o se frena), desprende ondas electromagnéticas. Las ondas de radio, por ejemplo, se generan cuando las corrientes de electrones de una antena oscilan con las frecuencias correspondientes a aquella zona particular del espectro electromagnético. El cambio en la dirección del movimiento constituye también una aceleración; por tanto, la corriente circular de electrones radia. A velocidades bajas (inferiores a la de la luz), los electrones emiten radiación de baja frecuencia, muy débil, en casi todas las direcciones. Pero si los electrones viajan a velocidades relativistas (próximas a la de la luz), la radiación aumenta espectacularmente en intensidad, direccionalidad y frecuencia.

Los sincrotrones y los anillos de almacenamiento son máquinas que conducen electrones relativistas según trayectorias circulares mediante potentes imanes; son, pues, fuentes de tal radiación electromagnética. (La radiación se observó, por primera vez, en 1947 en un sincrotrón de electrones de la empresa General Electric; de ahí su nombre.) Un sincrotrón transporta electrones de baja energía hasta una energía elevada; con ésta, se les obliga a chocar contra un blanco. Operación que puede realizar entre 50 y 60 veces por segundo. Los electrones pueden inyectarse en el anillo de almacenamiento con la energía de funcionamiento del anillo o con menor energía. En este úl-

timo caso, el anillo funciona durante un breve lapso como si se tratara de un sincrotrón para elevar la energía del haz, antes de obligarle a circular durante horas a una energía constante.

Sincrotrones y anillos de almacenamiento constan de una cámara anular de vacío, a cuyo alrededor se han colocado dos tipos básicos de imanes: imanes de focalización e imanes de curvatura. Los polos múltiples de un imán de focalización establecen un campo magnético no uniforme que actúa como una lente y confinan los electrones en un haz delgado a medida que viajan por la cámara. Un imán desviador, o de curvatura, establece esencialmente un campo magnético uniforme en una dirección perpendicular a aquella en que se mueven los electrones. Tal campo curva la trayectoria de los electrones. Por tanto, la trayectoria real descrita por un haz de electrones no suele crear ninguna circunferencia perfecta; antes bien, dibuja una serie de arcos circulares, cada uno en correspondencia con un imán de curvatura, unidos por seg-



1. VIBRADOR de electrones. El ingenio induce a los electrones que recorren el tubo de vacío, que él abarca, a emitir luz ultravioleta e intensos rayos X. El dispositivo, proyectado y construido en el Laboratorio Lawrence Berkeley, consta de dos hileras de 30 polos de imanes permanentes. En su creación intervinieron múltiples instituciones; entre ellas, distintos laboratorios encabezados por el propio Lawrence Livermore, la Universidad de California y Stanford.

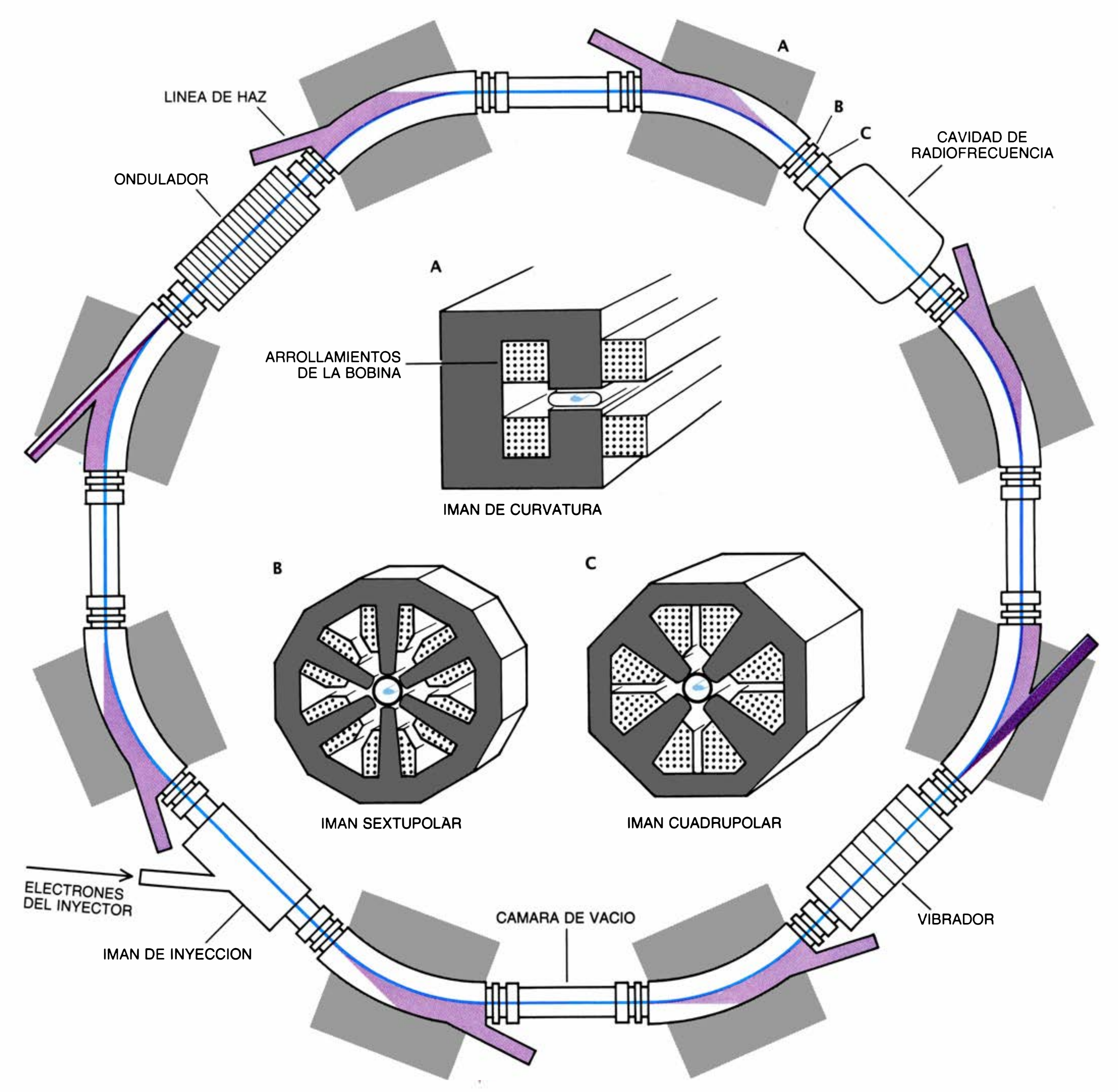
mentos rectos. La radiación de sincrotrón producida por los electrones que se desvían en el imán de curvatura emerge según líneas tangenciales al haz [*véase la figura 2*].

La cámara anular de vacío atraviesa también una o más cavidades en las que se generan campos electromagnéticos que oscilan a radiofrecuencias. Estos campos restituyen la energía perdida por los electrones al emitir radiación de sincrotrón y elevan, si hace falta, la energía del haz de electrones. Dividen también el haz circulante en "paquetes" de electrones, que suelen tener una longitud de unos centímetros.

Los anillos de almacenamiento proporcionan un haz de electrones mucho más estable, así como una intensidad de radiación y un espectro más constantes que los sincrotrones. De ahí que se hayan convertido en la fuente predominante de radiación de sincrotrón. El cambio de sincrotrones a anillos de almacenamiento como fuentes de radiación empezó en 1968, cuando Ednor M. Rowe y sus colaboradores adaptaron, para este fin, el anillo de almacenamiento Tántalus de la Universidad de Wisconsin.

Propiedades de la radiación

Producida por un sincrotrón o por un anillo de almacenamiento, la radiación de sincrotrón ofrece varias propieda-



2. ANILLO DE ALMACENAMIENTO dedicado a la producción de radiación de sincrotrón. Se estructura en torno a una cámara anular de vacío por donde circula un haz de electrones (*azul*). Un campo electromagnético oscilante establecido en una cavidad de radiofrecuencia proporciona la energía necesaria para mantener las partículas a velocidades relativistas (casi tan rápidas como la luz), tras su inyección en el anillo desde un acelerador externo (que no se muestra). Imanes de focalización cuadrupolares y sextupolares confinan a los electrones en un haz delgado, mediante campos establecidos por cuatro y seis polos respectivamente, colocados radialmente alrededor de la cámara de vacío. Imanes de curvatura fuerzan al haz de electrones a curvarse, haciendo que las partículas emitan radiación de sincrotrón (*púrpura*). El anillo puede también incluir otros dispositivos magnéticos, llamados vibradores y onduladores, que aumentan sustancialmente el "brillo" de la radiación, una medida de su concentración. Unos tubos, llamados líneas de haz, canalizan la radiación hacia las estaciones.

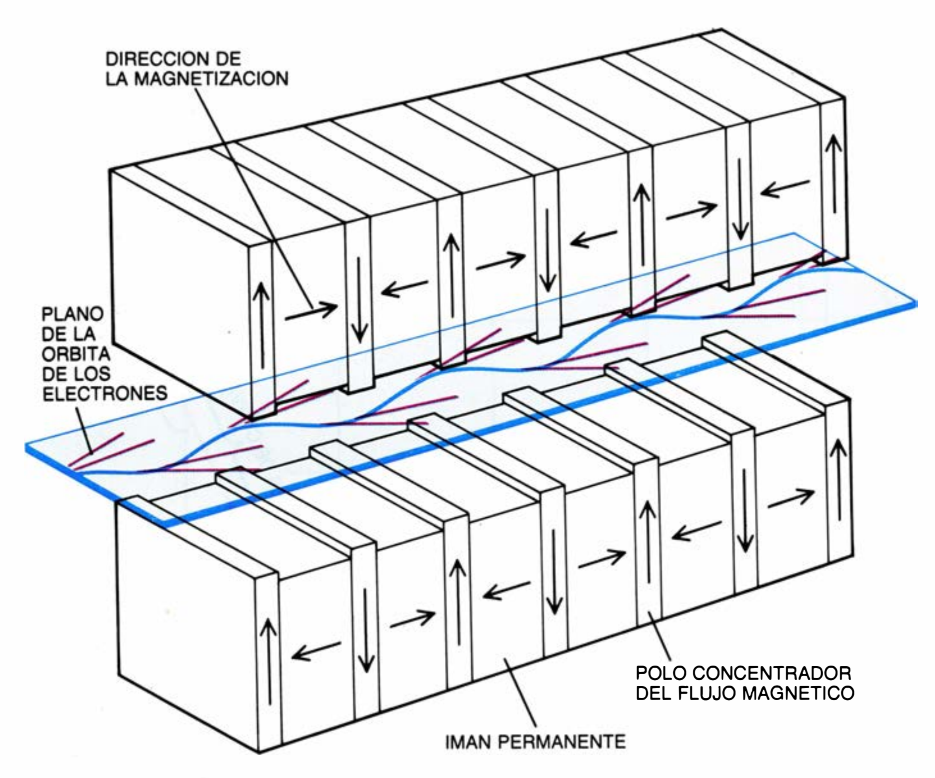
des, algunas de las cuales indicó, ya en 1898, A. Liénard. Casi toda la radiación emitida por un electrón en un instante dado, cuando se curva en un imán desviador, está contenida en un cono que apunta hacia delante y que tiene un ángulo de abertura muy pequeño. Este ángulo de emisión natural viene a ser igual a la razón entre la energía correspondiente a la masa en reposo del electrón (dada por la famosa ecuación de Einstein $E = mc^2$) y la energía total del electrón, que incluye su masa en reposo y su energía cinética. La energía de un electrón se suele medir en electronvolt (se llama electronvolt a la energía ganada por un electrón en el vacío cuando se acelera mediante una diferencia de potencial de un volt). Como la masa en reposo del electrón corresponde a una energía de 0,5 MeV (millones de electronvolt), si se da a un electrón una energía total de 5 GeV (miles de millones de electronvolt), el ángulo natural en el que se emite la radiación de sincrotrón será de sólo 0,0001 radianes, unos 0,006 grados. Podemos imaginarlo como un haz de rayos paralelos, de geometría similar a los estrechos haces de los láseres.

A medida que el electrón va describiendo un arco circular en un imán de curvatura, el eje del estrecho cono de la radiación se mueve con el electrón. Aunque el ángulo de emisión vertical permanece siendo pequeño, la radiación barre una amplia zona horizontal, anchura que suele cifrarse en varios grados. Para recoger la mayor parte posible de esta emisión horizontal, a fin de proporcionar un gran número de fotones a la línea de haz, se utilizan espejos y otros elementos ópticos.

La radiación de sincrotrón goza de propiedades exclusivas, que no ofrecen las fuentes convencionales de luz (lámparas de descarga gaseosa) y de rayos X (tubos de impacto de electrones). Así, la radiación de sincrotrón está muy polarizada; es decir, el campo eléctrico oscilante asociado a la radiación vibra principalmente en el plano de la órbita del electrón. Además, como el haz de electrones está estructurado en paquetes, la radiación se emite mediante pulsos. Estos pulsos pueden ser brevísimos: décimas de milmillonésima de segundo; según el tamaño del anillo y de cuantos paquetes de electrones estén circulando, el ritmo en el que los pulsos se repiten puede variar entre unas 100.000 y 500 millones de veces por segundo.

Existen también notables diferencias entre los espectros de la luz VUV y la radiación X producidas por los anillos de almacenamiento y las producidas por las fuentes convencionales. La radiación de sincrotrón es extremadamente potente en un amplio continuo de longitudes de onda, en tanto que las lámparas de descarga gaseosa y los tubos de rayos X emiten principalmente radiación a través de longitudes de onda discretas, y pocas, que se superponen en un fondo continuo muy débil.

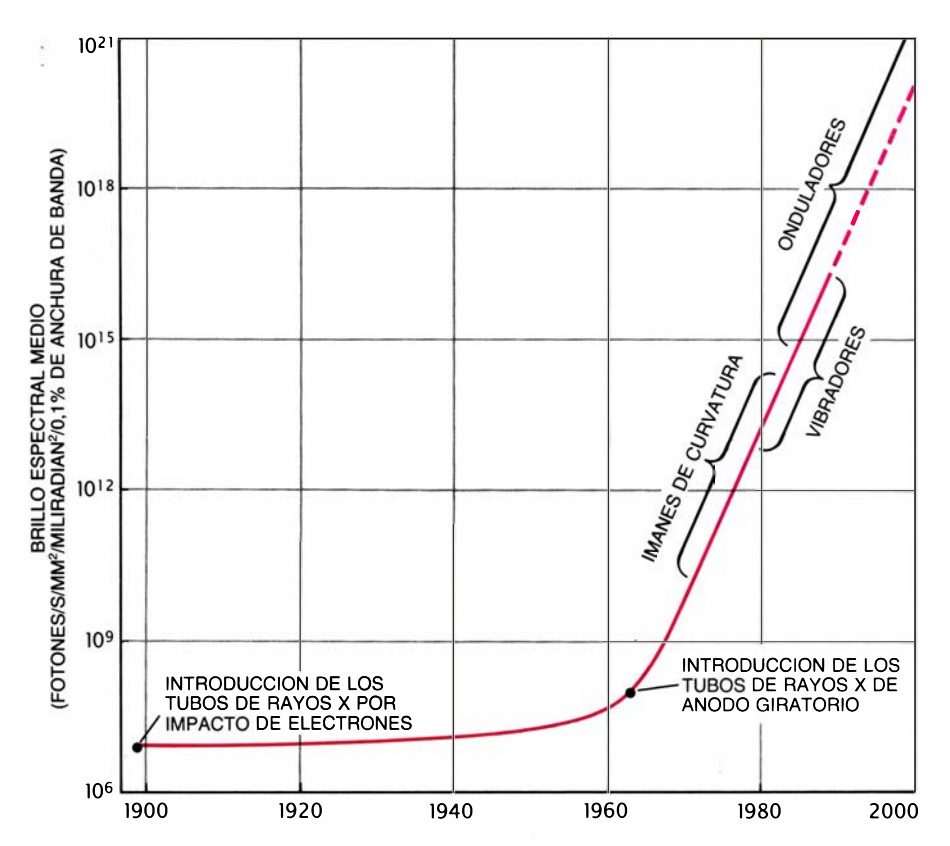
Del amplio espectro proporcionado por la radiación de sincrotrón, a los físicos experimentales sólo les interesa una estrecha franja de longitudes de onda (anchura de banda). Para una anchura de banda dada, la radiación de sincrotrón de los imanes de curvatura puede proporcionar, por lo menos, 1000 veces más fotones por segundo que las fuentes convencionales de VUV y rayos X. Se llama flujo de la radiación a ese número de fotones emitidos por segundo dentro de cierta anchura de banda. Pero la característica más importante de una fuente suele ser su brillo (conocido también por radiancia): el flujo dividido por el ángulo bajo el cual se emite la radiación y por la sección transversal de la fuente. El brillo nos da una indicación de la "concentración" de la radiación. Al poseer, la radiación de sincrotrón, un gran flujo, emitirse en un ángulo pequeño de manera natural y originarse en un haz de electrones de una sección transversal muy pequeña (a menudo inferior al milímetro cuadrado), presenta un brillo extraordinariamente intenso. La radiación de sincrotrón de los imanes de curvatura brilla un millón de veces más que otras fuentes de VUV y rayos X.



3. DISPOSITIVO DE INSERCION. Este, piénsese en un vibrador o un ondulador, produce radiación de sincrotrón que brilla bastante más que la radiación de un imán de curvatura. El dispositivo provoca que los electrones sigan una trayectoria sinusoidal, en vez de una curva, mediante una serie de campos magnéticos de polaridad alternante, perpendiculares a la dirección de movimiento de los electrones. Un vibrador aumenta el brillo de la radiación producida por un haz dado de electrones en un factor aproximadamente igual a dos veces el número de oscilaciones completas que sufre el haz. Las deflexiones del haz son menores en el ondulador que en el vibrador; en teoría, el brillo de la radiación puede aumentar en un factor aproximadamente igual al cuadrado del número de oscilaciones, pero sólo para energías discretas de los fotones.

Vibradores y onduladores

El flujo y el brillo de la radiación de sincrotrón crecerán todavía más si los electrones que circulan por el anillo de almacenamiento se ven forzados a movimientos de agitación. De esa misión se ocupan los dispositivos magnéticos: vibradores y onduladores. Unos y otros se acomodan entre los imanes de curvatura del anillo de almacenamiento. Constan ambos de dos hileras de imanes que establecen muchos campos de polaridad alternante y perpendiculares al haz de electrones. Los campos magnéticos alternantes determinan que el haz de electrones que avanza por el dispositivo se mueva de un lado a otro, o arriba y abajo; en virtud de ello, cada electrón describe una trayectoria sinusoidal. A medida que va curvándose, el electrón emite radiación, por la misma



4. BRILLO DE LOS RAYOS X y su aumento en varios órdenes de magnitud desde la existencia de las fuentes de radiación de sincrotrón. Los onduladores instalados en los anillos constituyen la fuente más brillante.

razón que lo hace cuando describe un arco circular en un imán de curvatura.

Los vibradores se distinguen de los onduladores por la cuantía de desviación angular que producen los polos magnéticos. En un vibrador, el ángulo es grande comparado con el de emisión natural de la radiación de sincrotrón. Ello produce un espectro continuo parecido al que se crea en un imán de curvatura dotado de la misma intensidad de campo magnético: sin embargo, la radiación posee un flujo y un brillo mayores. (Cuanto más intenso sea el campo magnético de un imán de curvatura o de un vibrador, el espectro cubrirá mayores energías de los fotones.) El flujo y el brillo de la radiación que emana de un vibrador supera el de un imán de curvatura, cuya intensidad de campo magnético sea parecida, en un factor aproximadamente igual al número de polos o dos veces el número de oscilaciones completas que sufre el haz de electrones.

En un ondulador, la desviación angular provocada por cada conjunto de polos es menor que el ángulo de emisión natural, o equivalente al mismo. Aquí, las ondas electromagnéticas radiadas por cada electrón pueden reforzarse o anularse mutuamente para amplificar la emisión de ciertas longitudes de onda en ciertos ángulos de emisión; de ello resulta un brillo intensísimo en las longitudes de onda amplificadas. La radiación que emana de un ondulador tiene también un grado de coherencia que es proporcional al brillo de la radiación. La coherencia mide la capacidad para formar patrones de iluminación resultantes de la interferencia de las ondas electromagnéticas originadas en distintos puntos o que arriban en distintos tiempos.

Para un haz de electrones ideal (que no tienda a dispersarse, sino que mantenga una sección transversal muy pequeña), el brillo de la radiación producida por un ondulador es mayor que el creado por un imán de curvatura en un factor aproximadamente igual al cuadrado del número de oscilaciones. Se han construido ya onduladores que obligan al haz de electrones a realizar 60 oscilaciones; hay en proyecto otros que elevarán esa cifra a varios centenares.

Ensayos pioneros

El primer vibrador que sirvió de fuente de radiación en aplicaciones experimentales se instaló, en 1978, en el anillo de almacenamiento de 4 GeV SPEAR, del Laboratorio de Radiación de Sincrotrón de Stanford (SSRL). Constaba de seis polos electromagnéticos que provocaban tres oscilaciones completas del haz de electrones y podían mantener un máximo de campo magnético cuya intensidad duplicaba de lejos el de los imanes de curvatura del anillo.

Si bien los onduladores se habían estudiado ya en aceleradores lineales en la Universidad de Stanford durante los años 50 y en sincrotrones en la URSS durante los 70, el motivo principal que indujo la construcción de esos dispositivos fue comprobar los principios de su funcionamiento; producían, sobre todo, luz visible. Hasta 1979, el desarrollo de un ondulador capaz de generar luz VUV y radiación X tropezó con graves dificultades, pues creíase que tal ondulador debería incorporar bobinas superconductoras, complejas y costosas, en sus polos electromagnéticos. (Se trataba de evitar el sobrecalentamiento de las bobinas.)

La situación cambió a raíz de los trabajos de Klaus Halbach en el Laboratorio Lawrence Berkeley (LBL). Halbach demostró que, en vez de electroimanes, podían colocarse hileras simples de imanes permanentes e intensos, fabricados de elementos de las tierras raras y cobalto, que permitieran construir dispositivos de campos alternantes. Tales dispositivos presentan una peculiaridad interesante: la intensidad de campo en el intervalo entre los polos permanece constante, aun cuando todas las dimensiones lineales se reduzcan escaladamente. Significa ello que pueden prepararse dispositivos de inserción de imanes permanentes de polos pequeños (permitiendo más oscilaciones del haz de electrones a lo largo de una longitud dada). Se obvia así el inconveniente del calentamiento de las bobinas a medida que van menguando, problema en el que caían muy pronto los dispositivos basados en electroimanes. El trabajo de Halbach implicaba la posibilidad de fabricar, de manera bastante sencilla y económica, onduladores de imanes permanentes y adecuados para servir de fuente de VUV y rayos X en anillos de almacenamiento.

El primer ondulador diseñado para suministrar rayos X en investigación experimental se instaló en el anillo de almacenamiento SPEAR, a finales de 1980, fruto de un empeño conjunto del LBL y el SSRL. Proporcionó radiación X con energías de los fotones en torno a 1 KeV (1000 electronvolt) y cuyo brillo centuplicaba la radiación proporcionada por los imanes de curvatura del anillo. En su primera aplicación como fuente de radiación, en 1981, se utilizó

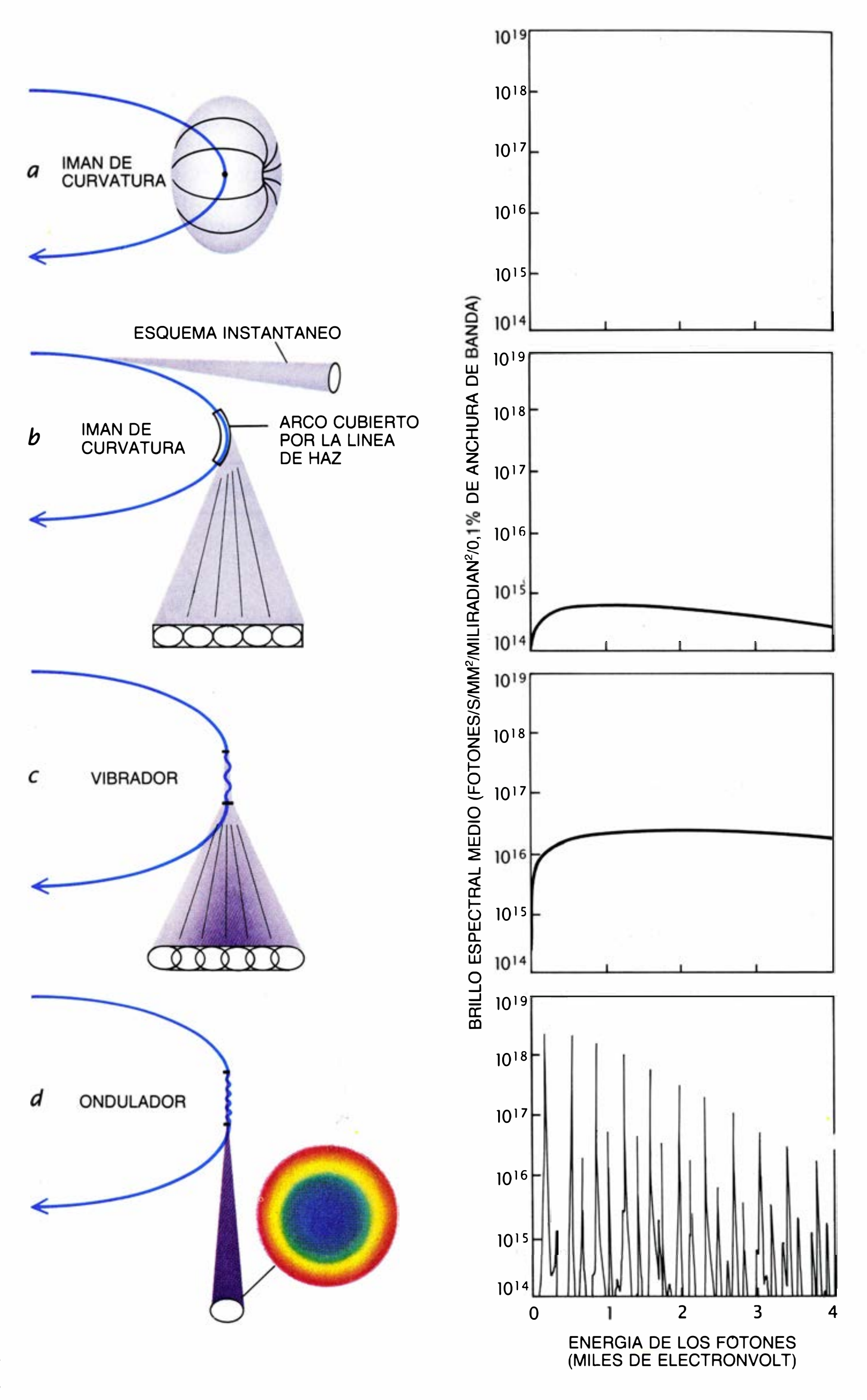
un agujerito para seleccionar la anchura de banda adecuada para el experimento, aprovechando la correlación natural entre la longitud de onda y el ángulo de emisión de la radiación del ondulador. El ondulador liberaba fotones en una cifra cuatro órdenes de magnitud superior que la que había facilitado hasta entonces la línea del haz del imán de curvatura. Por las mismas fechas, Gennady Kulipanov y Niccolai Vinokurov construyeron un instrumento similar en Novosibirsk, Unión Soviética.

La prueba dio un fuerte impulso, en el SSRL y otros laboratorios, al desarrollo de dispositivos de inserción en sus anillos, es decir, vibradores y onduladores. Se utilizan ya un total de unas 20 líneas de haz de dispositivos de inserción como fuentes de radiación en todo el mundo, y hay más en construcción. Se están realizando grandes esfuerzos para agregar líneas de haz de dispositivos de inserción en los mayores centros enteramente dedicados a la producción de radiación de sincrotrón, tales como la Fábrica de Fotones de Japón y la Fuente Nacional de Luz de Sincrotrón de Brookhaven, Estados Unidos.

Aplicaciones científicas

De estas mejoras de las fuentes de radiación de sincrotrón se beneficiarán un amplio abanico de aplicaciones científicas. Las longitudes de onda de los intervalos de VUV y rayos X cubiertas por la radiación de sincrotrón tienen las mismas dimensiones que las estructuras características de los átomos y las moléculas, lo que convierte a esta radiación en excelente sonda para conocer la estructura de la materia. Además, la radiación de sincrotrón es "sintonizable": se puede seleccionar, mediante un monocromador, una anchura de banda muy estrecha en la banda, intensa y ancha, de la fuente. En el dominio de la VUV, un monocromador es una red de difracción: un trozo de material pulido en el que se han rayado o grabado muchos surcos muy juntos.

El dominio de los rayos X no permite utilizar estas redes ante la imposibilidad de crear surcos lo suficientemente juntos para ajustarse a las longitudes de onda más cortas de la radiación. En su lugar, se emplean los planos de los átomos de un gran cristal monolítico. En los electrones de los átomos, se refleja una longitud de onda determinada a través del proceso de dispersión de Bragg. Se logran así haces de rayos X



5. ESQUEMA DE EMISION Y ESPECTRO DE ENERGIA de los fotones generados en un anillo de almacenamiento. Ambos dependen de la velocidad de los electrones y del dispositivo por donde viajan. Si los electrones atravesaran un imán de curvatura a velocidades mucho menores que la de la luz (*a*), emitirían radiación en casi todas las direcciones, pero la radiación sería tan difusa y de tan baja energía que ni siquiera aparecería en el gráfico. Los electrones que pasan por un imán de curvatura a velocidades relativistas (*b*) producen una radiación mucho más intensa (incluidos fotones de altas energías), emitida en un estrecho cono tangente a su trayectoria curva. Como el eje del cono coincide con la dirección de movimiento de los electrones, realiza un barrido durante el transcurso del electrón. Los electrones relativistas de un vibrador (*c*) producen un haz parecido, aunque mucho más brillante, que resulta de la superposición de la radiación que surge de cada oscilación del haz de electrones. El haz que emana de un ondulador (*d*) se encuentra mucho más focalizado y, por tanto, brilla mucho más. Debido a los efectos de interferencia, los fotones se concentran, en función de su energía (indicada con distintos colores), a determinados ángulos respecto del eje del haz, permitiendo emplear un agujero o una rendija anular para seleccionar la radiación de cierta energía.

con energías definidas hasta una parte en 10.000 y, en algunos casos, en 100.000. Los investigadores han conseguido, hace poco, definir la energía de los haces de rayos X hasta un valor espectacular, de una parte en un billón, dispersando la radiación de sincrotrón mediante los núcleos de los átomos de una red cristalina (dispersión de Bragg nuclear). El hecho de que la radiación de sincrotrón pueda sintonizarse con tanta precisión amplía el intervalo de fenómenos susceptibles de abordarse con estos haces de rayos X.

La sintonización de la radiación de sincrotrón permite sacar partido a otro dato: cada elemento químico presenta un drástico incremento de la absorción en ciertas longitudes de onda, llamadas umbrales de absorción. Estos umbrales débense a que el electrón de un nivel de energía dado puede absorber un fotón (y escaparse del átomo) sólo cuando la energía del fotón supera cierto valor bien definido, conocido como energía de enlace del electrón.

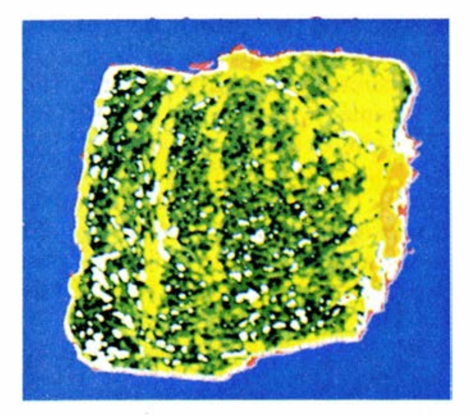
Gracias a la técnica de estructura fina de absorción de rayos X generalizada ("extended X-ray absorption fine structure", EXAFS), podemos conocer bastante bien las condiciones de entorno de los átomos de un elemento considerado; nos valemos para ello de las mediciones de absorción de rayos X realizadas en un barrido continuo de la energía de los fotones, desde debajo mismo de un umbral de absorción del elemento hasta varios centenares de volt por encima de dicho umbral. La fuente de radiación de sincrotrón permite efectuar tal barrido de la energía de los fotones en pocos minutos (en algunos casos, en pocos segundos); los generadores de rayos X convencionales necesitaban días o semanas. Por tanto, empleando radiación de sincrotrón, en vez de rayos X convencionales, los investigadores pueden medir muchas más muestras, estudiar especies más diluidas y seguir los cambios estructurales que se operan en el transcurso de las reacciones químicas. En resumen, la radiación de sincrotrón ha transformado la técnica del EXAFS, de mera curiosidad de interés, en un instrumento muy versátil de química analítica.

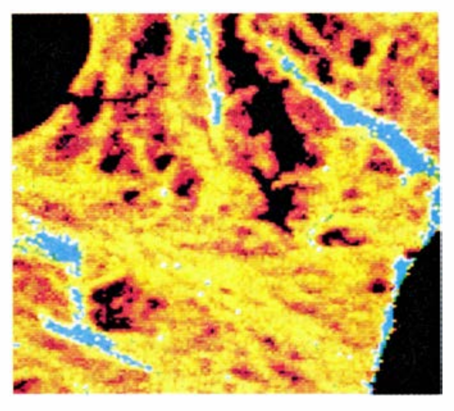
La sintonización, el brillo, la colimación y la estabilidad del haz de la radiación de sincrotrón han posibilitado también el desarrollo reciente de la microtomografía de rayos X: una nueva técnica de imagen microscópica que produce vistas de cortes seccionales de muestras pequeñas. La técnica proporciona imágenes con una resolución que se aproxima a un micrometro (una millonésima de metro) —1000 veces mejor que los análisis tomográficos convencionales. Sintonizando las energías de los rayos X de manera que abarquen umbrales de absorción determinados, puede procesarse las imágenes y crear mapas estructurales de elementos específicos.

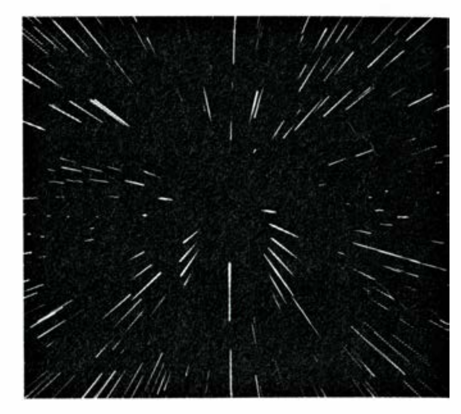
En contraposición a la absorción, la difracción o dispersión de rayos X puede de servir de sonda para determinar las propiedades magnéticas de los materiales y de las transiciones de fase en sistemas bidimensionales tales como capas superficiales y películas líquido-cristalinas. En estas dos aplicaciones, los efectos de interés son muy débiles y sólo una radiación de altísima intensidad proporciona un número razonable de rayos X dispersados. Los ángulos y energías en los que se dispersan los rayos X pueden aportarnos importante información. Estas y otras técnicas de rayos X han abierto nuevas posibilidades para conocer las disposiciones atómicas en muchos sistemas de materia condensada.

Pueden también explotarse otras

6. ESPECTRO DE LA RADIACION ELECTROMAGNETICA. Representa el intervalo de longitudes de onda o energías de los fotones que son más útiles desde un punto de vista científico. El espectro sólo se puede cubrir mediante múltiples fuentes de radiación (*a la izquierda*). La radiación empleada (*centro*) para detectar un objeto debe tener una longitud de onda igual o menor que sus dimensiones. Las fuentes de radiación de sincrotrón proporcionan radiación extraordinariamente brillante en las regiones ultravioleta y de rayos X, los cuales cubren las longitudes de onda adecuadas para estudiar las estructuras atómicas y moleculares.







7. IMAGENES obtenidas con radiación de sincrotrón, cedidas por Keith Moffat, Janos Kirz y la Compañía Exxon. Nos muestran su versatilidad. Los rayos X generados en anillos de almacenamiento pueden dispersarse en un cristal de proteínas y producir una figura de difracción (*izquierda*) que se recoge en una película. Tales figuras aportan información sobre la estructura del cristal. (Las rayas son producto de la rotación del cristal durante la exposición.) Como la absorción de rayos X de cada elemento aumenta de repente a determinadas energías de los fotones, llamados umbrales de absorción, la radiación X "sintonizable" que puede producirse en las fuentes de radiación de sincrotón permite obtener imágenes de los distintos elementos. Una micrografía de barrido de rayos X de un trozo de cráneo humano (*centro*) ilustra la distribución de calcio del hueso. La sensibilidad de los rayos X a los distintos elementos puede también aprovecharse en la microtomografía de rayos X, técnica que permite a los investigadores reconstruir un corte bidimensional de una muestra a partir de numerosas proyecciones de rayos X. Una imagen de esa naturaleza revela la microestructura interna de un grano minúsculo de carbón en corte transversal.

propiedades características de la radiación de sincrotrón. Por ejemplo, la polarización de la radiación permite determinar la orientación de las moléculas adsorbidas en las superficies, ya que la probabilidad de que un electrón de una molécula absorba un fotón de rayos X depende de la orientación de la molécula con respecto a la dirección de polarización del fotón. La información obtenida en ese tipo de medidas reviste gran interés, pues tales fenómenos superficiales se hallan en la base de la corrosión de materiales y de los procesos catalíticos de los que depende el refinamiento del petróleo.

De manera parecida, la naturaleza pulsante de la radiación de sincrotrón puede ser ventajosa en muchos experimentos, por ejemplo, en los diseñados para determinar la vida media de estados excitados de átomos o moléculas. Un pulso de radiación de sincrotrón, agudo y bien definido, dispara un reloj en el mismo instante en que incide sobre una muestra de material, excitando los átomos o moléculas hasta un nivel energético más alto. El reloj se para cuando un detector registra la llegada de una partícula o un fotón emitidos por el átomo o la molécula excitados que caen a un nivel de energía más bajo.

Las más intrigantes son quizás las aplicaciones potenciales permitidas por la radiación coherente proporcionada por los onduladores. Aunque no es tan coherente como la luz visible de algunos láseres, la radiación de los onduladores tiene niveles de coherencia mucho más elevados que los disponibles hasta entonces en las regiones del espectro de la VUV y los rayos X. A medida que se instalen más líneas de haz y onduladores más potentes en anillos de almacenamiento, se extenderán sin duda las aplicaciones basadas en esta coherencia, tales como la imagen holográfica de rayos X.

Aplicaciones técnicas

Las singulares características de la radiación de sincrotrón abren nuevas perspectivas para la medicina y la industria. La posibilidad de sintonizar la radiación a los umbrales de absorción de un elemento, por ejemplo, admite una aplicación provechosa en las radiografías de diagnóstico médico. Los angiogramas, o imágenes de los vasos sanguíneos, se obtienen hoy inyectando una solución iodada en la circulación y exponiendo al paciente a rayos X generados por medios tradicionales. Como estos rayos X no están sintonizados al umbral de absorción del iodo y son bastante débiles, se precisa una elevada concentración de iodo. Además, en el caso de angiogramas de las arterias coronarias, la exposición no debe durar más que unos milisegundos si quiere evitarse la borrosidad causada por el movimiento del corazón. En la angiografía coronaria, la concentración necesaria de iodo se logra inyectando la solución a través de un catéter que se ha acercado por una arteria mayor hasta la proximidad de las arterias coronarias. Este método produce radiogramas de excelente calidad, pero conlleva riesgos importantes, amén de su carácter penetrante.

La sensibilidad al iodo y otros agentes de contraste puede incrementarse en dos o más órdenes de magnitud señalando la diferencia entre dos exposiciones realizadas con haces de rayos X monocromáticos, un haz con una energía por encima mismo del umbral de absorción y el otro con una energía inmediatamente por debajo [*véase la figura 8*]. Tales haces se pueden producir fácilmente utilizando la radiación de sincrotrón. Establecida la diferencia entre ambas imágenes, se amplía el contraste entre los vasos sanguíneos portadores de iodo y los restantes tejidos del cuerpo, pues los tejidos no vasculares se han "sustraído".

Esta técnica de sustracción energética dual podría facilitar la obtención de imágenes de las arterias coronarias en menos tiempo y con una concentración de iodo mucho menor que la necesaria para la angiografía al uso. La menor concentración puede eliminar la necesidad de un catéter intraarterial, reduciendo, por tanto, el riesgo de manera considerable.

La radiación X colimada e intensa que puede generarse en los anillos de almacenamiento encierra aún otra aplicación de gran importancia potencial para la industria electrónica: la fabricación de circuitos integrados de alta densidad. Las pastillas de circuitos integrados ("chips") suelen fabricarse aplicando técnicas de litografía óptica para grabar las sucesivas capas de circuitos en una oblea de material semiconductor. El esquema de los circuitos se define cubriendo la oblea con una sustancia sensible a la luz llamada fotorresistor e iluminando la oblea cubierta con luz visible o ultravioleta a través de una "máscara", o plantilla con el guión impreso. Según sea el tipo de fotorresistor, se elimina fácilmente la parte expuesta, o la no expuesta, del fotorresistor; las partes remanentes delinean el patrón.

El tamaño mínimo, y por tanto el número máximo, de elementos de un circuito viene indicado por los efectos de difracción que desdibujan el esquema expuesto a través de la mascarilla. El tamaño de estos efectos depende de la longitud de onda de la radiación que ilumina la máscara. Si se utiliza luz visible o ultravioleta, sólo pueden reproducirse con precisión los detalles que superen los 500 nanómetros. La luz de longitud de onda más corta (los rayos X "blandos", con una longitud de onda comprendida entre uno y dos nanómetros parecen óptimos) permitiría replicar con fidelidad detalles del orden de 50 nanómetros o menos. En una aplicación afín, conocida como micromecanizado de rayos X, se pueden obtener estructuras no electrónicas en superficies de materiales, con una razón de altura a anchura muy grande si el fotorresistor se ilumina con rayos X de mayor energía. Esta técnica litográfica puede aplicarse en la fabricación de filtros y huecos microscópicos.

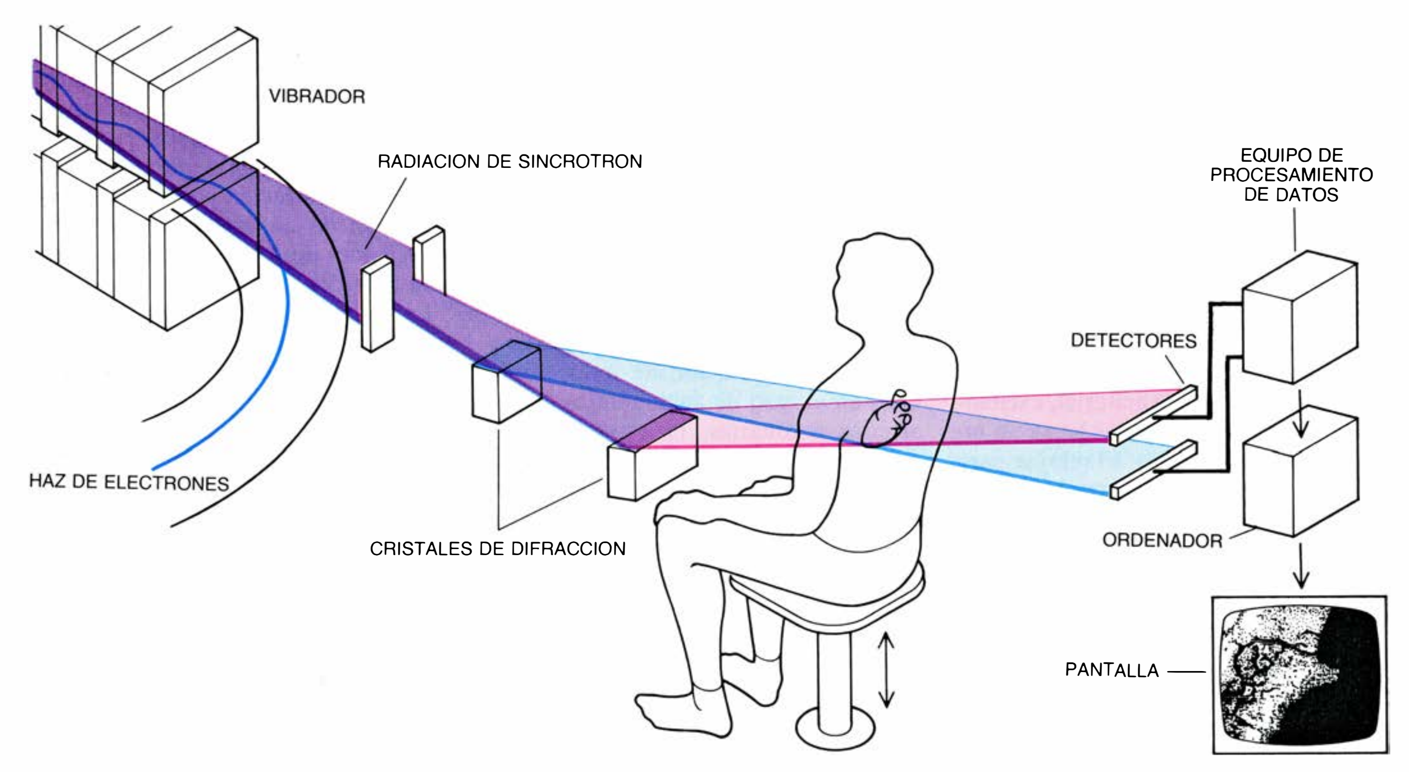
Para abaratar la litografía de rayos X, como si de una técnica de producción en masa se tratara, se requieren tiempos de exposición del orden de un segundo. Al parecer, sólo las fuentes de radiación de sincrotrón pueden proporcionar radiación X de las intensidades necesarias para hacer factibles tales tiempos de exposición. La posibilidad de que la litografía de rayos X sea la técnica elegida para producir en masa elementos de circuito menores que los obtenidos con litografía de luz visible o ultravioleta ha conducido a grupos del Japón, Alemania Occidental, Gran Bretaña y los Estados Unidos a diseñar anillos de almacenamiento especiales destinados a este fin. Para lograr el medio de producción más compacto, algunos diseños de anillos de almacenamiento incorporan imanes superconductores de curvatura.

Anillos de almacenamiento

A pesar de las infinitas aplicaciones de la radiación de sincrotrón, ningún anillo de almacenamiento es capaz, hoy, de sacarle todo el partido a los dispositivos de inserción, en particular a los onduladores. Ante semejante impotencia, asistimos a un empeño decidido por proyectar y construir la próxima generación de anillos de almacenamiento pensados para alojar vibradores y onduladores. El primero de estos, el anillo Super-ACO de 0,8 GeV de Orsay, Francia, empezó a funcionar a principios de 1987. Se acaba de autorizar la construcción de otros más. Así, la Fuente de Luz Taiwan, de 1,3 GeV, el Dispositivo Europeo de Radiación de Sincrotrón, de 6 GeV, en Grenoble, la Fuente avanzada de Luz, de 1,5 GeV, en Berkeley, un anillo de 1,5 GeV en Trieste y otro de 2,5 GeV en Moscú. Otros grupos están preparando anteproyectos de tales anillos: el Argonne norteamericano y distintos centros de Brasil, Alemania Federal y la URSS.

Estos nuevos anillos de almacenamiento dispondrán de tramos rectos para instalar vibradores y onduladores y contarán con haces de electrones con propiedades optimizadas que aumenten de manera decisiva el rendimiento de esos ingenios incorporados. En particular, los haces de electrones almacenados en estos anillos poseerán un diámetro pequeño y se verán exentos de la tendencia a dilatarse; esa combinación de propiedades recibe la denominación de baja emitancia.

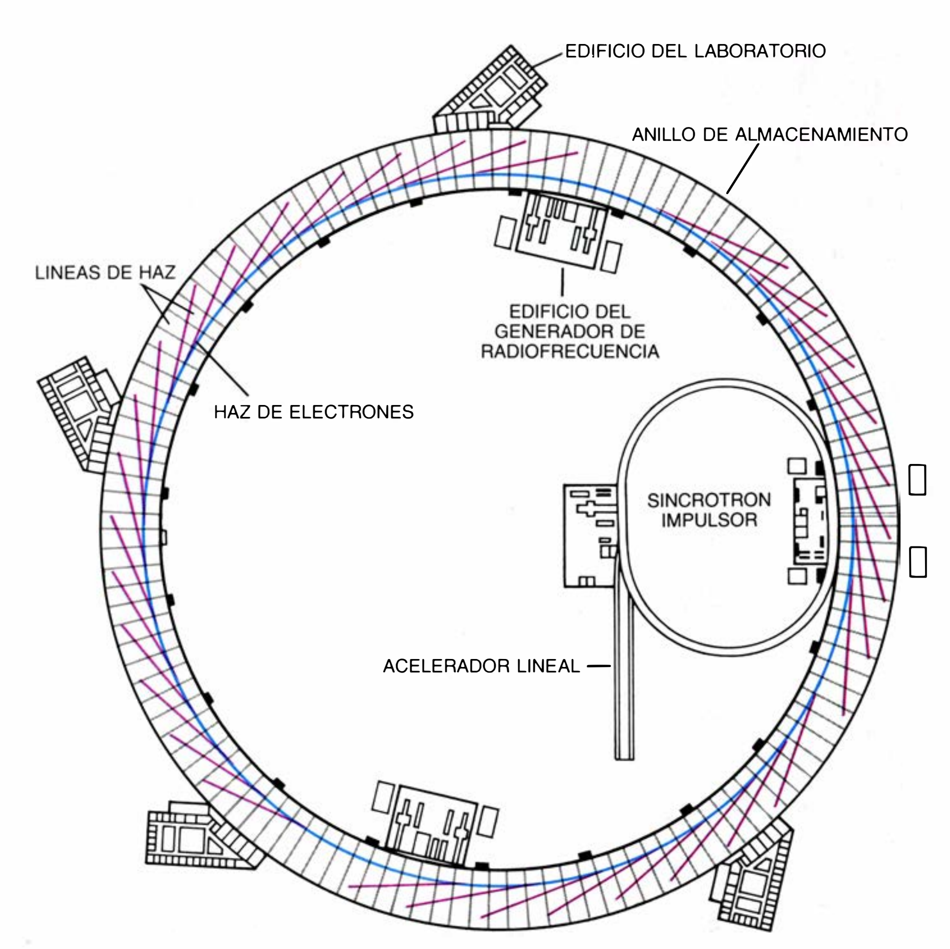
Según avanzaron en 1976 Ken Green y Rena Chasman, del Laboratorio Nacional de Brookhaven, cuanto más baja sea la emitancia de un haz de electrones, mayor será el brillo de los haces de radiación que produzca. La mayoría de los anillos existentes tienen emitancias de 100 nanómetro-radián, o más. Algunos anillos en construcción ofrecen



8. ANGIOGRAFIA CORONARIA (representación de las arterias coronarias). Este proceso es más sensible y encierra un riesgo potencialmente menor cuando se utiliza radiación de sincrotrón que cuando se realiza con las fuentes de rayos X al uso. Se inyecta una solución iodada en la sangre del paciente. Ciertos cristales de difracción especiales convierten la radiación de sincrotrón en haces con la energía de los fotones por encima y por debajo de un umbral de absorción del iodo. Ambos haces convergen en el corazón del paciente y divergen después, para ir a parar a detectores independientes. El tejido blando y los huesos absorben aproximadamente igual los dos haces de energías distintas, pero el iodo absorbe mucho más el haz de mayor energía. Estableciendo la diferencia entre las imágenes generadas por ambos detectores se "resta" realmente la mayor parte de los tejidos y los huesos del cuerpo del paciente, y se deja una imagen en la que se amplían las arterias coronarias y los otros vasos sanguíneos. La angiografía convencional precisa que el iodo se introduzca en las propias arterias.

valores nominales entre cinco y 10 nanómetro-radián y permitirán a sus onduladores un brillo cien veces mayor que el alcanzado por los onduladores de los anillos existentes.

Sin embargo, los niveles máximos de brillo y coherencia de la radiación de los onduladores que tienen interés práctico sólo se alcanzan en el llamado límite de difracción, en el que la emitancia del haz de electrones es numéricamente igual a una décima de la longitud de onda de la radiación. Los efectos de difracción impiden que cualquier emitancia más baja mejore la radiación. Así, un haz de electrones limitado por la difracción, y capaz de producir rayos X de 0,1 nanómetros (12,4 KeV), tendría una emitancia aproximada de 0,01 nanómetro-radián.



9. UN GRAN CENTRO DE RADIACION DE SINCROTRON, tal como el que aquí se ilustra, puede tener una circunferencia de un kilómetro y permitir a miles de investigadores la realización de experimentos de pequeña escala en los extremos de muchas líneas de haz. El anillo de almacenamiento, por donde circulan electrones o positrones con energías de entre 6 y 8 GeV (miles de millones de electronvolt), está diseñado para producir radiación extremadamente brillante con energías de los fotones muy por encima de los 10 KeV (miles de electronvolt). Un centro así se está construyendo en Grenoble, Francia, en un proyecto de colaboración europeo. Hay anteproyectos de otros en Japón y los Estados Unidos. (Esquema de G. Retseck.)

Aumento del rendimiento del anillo

La obtención de emitancias tan bajas constituye todo un desafío capaz de desanimar a los ingenieros de anillos de almacenamiento. La emitancia del haz en un anillo de almacenamiento de electrones viene determinada por un equilibrio establecido entre procesos que hacen oscilar transversalmente a los distintos electrones respecto del haz y procesos que amortiguan dichas oscilaciones ("oscilaciones de betatrón"). Débense éstas a la emisión de fotones que forman un pequeño ángulo con respecto a la dirección del movimiento de un electrón, ya que la emisión provoca que el electrón retroceda en una dirección transversal a su movimiento. Las cavidades de radiofrecuencia amortiguan las oscilaciones de betatrón, al tiempo que restituyen la energía perdida en forma de radiación de sincrotrón, ya que las cavidades proporcionan momento lineal a los electrones sólo en la dirección del movimiento del haz.

La emitancia del haz de electrones resultante depende de la disposición específica de los imanes de curvatura y de focalización, que constituyen la red de imanes del anillo. La red de imanes debe proporcionar también una "abertura dinámica" apropiada: espacio requerido para que los electrones se desvíen en oscilaciones de betatrón estables con respecto a la trayectoria diseñada para el haz de electrones. Los electrones recién inyectados en el anillo se ven sometidos a esas desviaciones; se inducen también cuando los electrones chocan con moléculas de gas residual en el sistema vacío. Finalmente, los electrones oscilantes se acumulan en el núcleo del haz almacenado, como resultado del efecto de amortiguamiento combinado de la radiación de sincrotrón y de las cavidades de radiofrecuencia. Sin embargo, la red de imanes debe proporcionar una abertura dinámica suficiente para evitar que el haz pierda demasiados electrones antes de que se produzca la amortiguación. Una gran abertura dinámica facilita también las tolerancias en la alineación de los imanes y en la calidad de su campo y torna más fluido el funcionamiento del anillo.

La baja emitancia puede lograrse, en general, focalizando el haz con muchos imanes cuadrupolares y sextupolares potentes. Por desgracia, el carácter no lineal de los campos sextupolares que se necesitan para corregir aberraciones en los efectos de focalización de los campos cuadrupolares provoca una limitación del intervalo de oscilaciones estables de las partículas, es decir, una abertura dinámica pequeña. En consecuencia, debe tenerse un especial cuidado en el diseño de la red de imanes de manera que se asegure una abertura dinámica de tamaño suficiente cuando se reduzca la emitancia.

Otra posible manera de lograr una emitancia muy baja consiste en colocar en el anillo decenas, o incluso centenares, de metros de vibradores especialmente diseñados. Este método puede constituir una buena forma de obtener una emitancia sumamente baja, porque no debe reducir la abertura dinámica. Helmut Wiedemann, de la Universidad de Stanford, ha calculado que si se utilizan 200 metros de vibradores amortiguantes, la emitancia del anillo de almacenamiento PEP, de Stanford, podría rebajarse en un factor aproximado de 10 cuando el anillo funciona a 6 GeV, alcanzando el respetable valor de 0,5 nanómetro-radián.

Hay muchos retos técnicos más, implicados en la construcción de fuentes de radiación de sincrotrón optimizadas con dispositivos de inserción. Pensemos, por ejemplo, en los iones positivos producidos por las interacciones del haz de electrones con el gas residual

de la cámara de vacío —incluso a presiones de funcionamiento de unas billonésimas de la presión atmosférica—, que, capturados por el haz de electrones, cargado negativamente, provocan nuevas colisiones y efectos de focalización incontrolados. La mejor solución al problema de la captura de iones en los anillos de almacenamiento no parece ser tanto almacenar electrones cuanto almacenar positrones (la antimateria correspondiente a los electrones). Los iones positivos son repelidos por el haz de positrones, que produce también radiación de sincrotrón.

El elevado flujo radiado y la densidad de potencia de los nuevos anillos de almacenamiento plantean, a su vez, nuevos problemas. Los dispositivos de inserción actualmente en funcionamiento en los anillos de varios GeV producen una potencia total radiada de varios kilowatt, mientras que los componentes de la línea del haz están expuestos a una densidad de potencia de hasta 10 kilowatt por centímetro cuadrado. Esta es casi la densidad de potencia que hallamos en un arco de soldadura.

La densidad de potencia, mayor, que darán las futuras fuentes de radiación de sincrotrón exige, por tanto, progresar en el diseño de los componentes de la línea de haz, especialmente en los componentes ópticos, que deben mantener una fina precisión bajo el intenso esfuerzo térmico. El mayor flujo necesita también el desarrollo de detectores de fotones de alta velocidad y sistemas más potentes de procesamiento de datos. En resumen, casi todos los componentes de las líneas de haz y de las estaciones experimentales existentes han de mejorarse para adaptarse a las posibilidades de las fuentes de la próxima generación que se hallan en fase de proyecto o cuya construcción ya ha comenzado.

Ello no obstante, el esfuerzo que se le está dedicando valdrá la pena. Conforme esos nuevos anillos entren en funcionamiento, una pléyade de expertos, en ciencias básicas y aplicadas, podrá atacar muchos fenómenos conocidos que resultan inescrutables con las actuales fuentes de radiación. Más excitante resulta incluso la esperanza de que estas nuevas fuentes abran el camino a nuevos conocimientos científicos. Recordemos que los últimos veinte años han mostrado que, con cada orden de magnitud que mejoraba el flujo, el brillo, la coherencia o alguna otra propiedad de la radiación de sincrotrón, llegaban nuevas aplicaciones, en muchos casos inimaginables hasta que se pudo contar con la fuente.

Genealogía del panda gigante

¿Es el panda un oso o un mapache? ¿Pertenece a una tercera familia independiente? El análisis molecular ha abierto nuevas perspectivas en ese ya viejo problema de filiación genética

Stephen J. O'Brien

Tímido y apacible, el panda, *Ailuropoda melanoleuca*, habita, nómada, los bambusales alpinos de la periferia de la meseta tibetana, en China occidental. Sus inmensas ojeras y prominentes orejas, así como su aspecto juvenil y juguetón, han hecho de él uno de los animales más conocidos y estimados. Sin embargo, bajo el punto de vista evolutivo, es también uno de los más enigmáticos. Desde hace casi 120 años, los biólogos discrepan sobre la posición taxonómica exacta que le corresponde a esa especie; unas veces la colocan, junto con los osos, en la familia Ursidae; otras en la del mapache, Procyonidae, cuando no en una familia independiente, Ailuropodidae. Mis investigaciones, y las de mis colegas del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer y del Parque Zoológico Nacional de Washington, parecen indicar que hemos develado el misterio de la genealogía del panda.

La polémica comenzó en el año 1869, cuando Armand David –misionero y naturalista francés, afincado en China– describió el panda gigante por vez primera. David identificó el panda como una especie nueva para la ciencia y la denominó *Ursus melanoleucus* (oso blanco y negro). Al año siguiente, Alphonse Milne-Edwards, colega de David (y más tarde director del museo de Historia Natural de París), estudió el material óseo que le envió David y concluyó que el panda gigante tenía vínculos de parentesco más estrechos con el panda rojo, o panda menor, *Ailurus fulgens* (también de China), que con el oso. Se conocía ya la genealogía del panda menor, que se consideraba miembro de la familia del mapache, y Milne-Edwards juzgó que el aspecto osuno del panda gigante constituía una reminiscencia del pasado, reflejo de su descendencia de un antepasado común al oso y al mapache; lo rebautizó *Ailuropoda melanoleuca*.

Desde entonces se han publicado más de 40 tratados sobre la genealogía del panda gigante, sin que por ello se haya alcanzado un acuerdo definitivo sobre el asunto. Por ejemplo, en fecha tan reciente como 1964, D. Dwigth Davis, conservador de mamíferos del Museo de Campo de Historia Natural de Chicago, publicaba un extenso informe sobre la anatomía de *Ailuropoda* y concluía, a partir del estudio comparado de 50 sistemas de órganos, que el panda pertenece a la familia del oso. Poco después, Desmond Morris, conservador de la Sociedad Zoológica de Londres, y R. F. Ewer, de la Universidad de Ghana, concluían, por separado y basándose en argumentos morfológicos y etológicos, que el panda gigante per-



1. LING-LING y su compañero Hsing-Hsing, que aparecen, a la derecha, en el Parque Zoológico Nacional de Washington, exhiben, como todos los pandas gigantes, un andar lento, reflejo de las largas horas que

tenece a la familia del mapache. Más recientemente, los etólogos John F. Eisenberg, de la Universidad de Florida, y George B. Schaller, de la Sociedad Zoológica de Nueva York, propusieron que se asignara el panda gigante a una familia propia: Ailuropodidae. Tal opinión fue refrendada en 1986 por un equipo de científicos chinos del Instituto zoológico y de la Universidad de Beijing, que publicaron un largo informe anatómico sobre el panda.

Tales problemas ilustran las dificultades con que se topan los sistemáticos a la hora de identificar las especies y determinar su parentesco con otros organismos. Una de las decisiones más trascendentales que ha de adoptar el sistemático es la de si un carácter es homólogo a otro similar de otra especie o si sólo es análogo. De ser homólogo, procederá de un ascendente común; es decir, todas las especies que lo poseen derivarán de un mismo antepasado. Todos los representantes de la clase Mammalia, por ejemplo, tienen pelo en el cuerpo, sus crías se alimentan a través de las glándulas mamarias de las hembras y tienen el corazón dividido en cuatro cámaras. Los miembros de la familia del gato poseen uñas retráctiles, cuatro dedos en las patas traseras y pupilas dilatables. El grado de parentesco evolutivo se determina contando el número de caracteres homólogos; cuanto más próximas sean dos especies, mayor será el número de homologías.

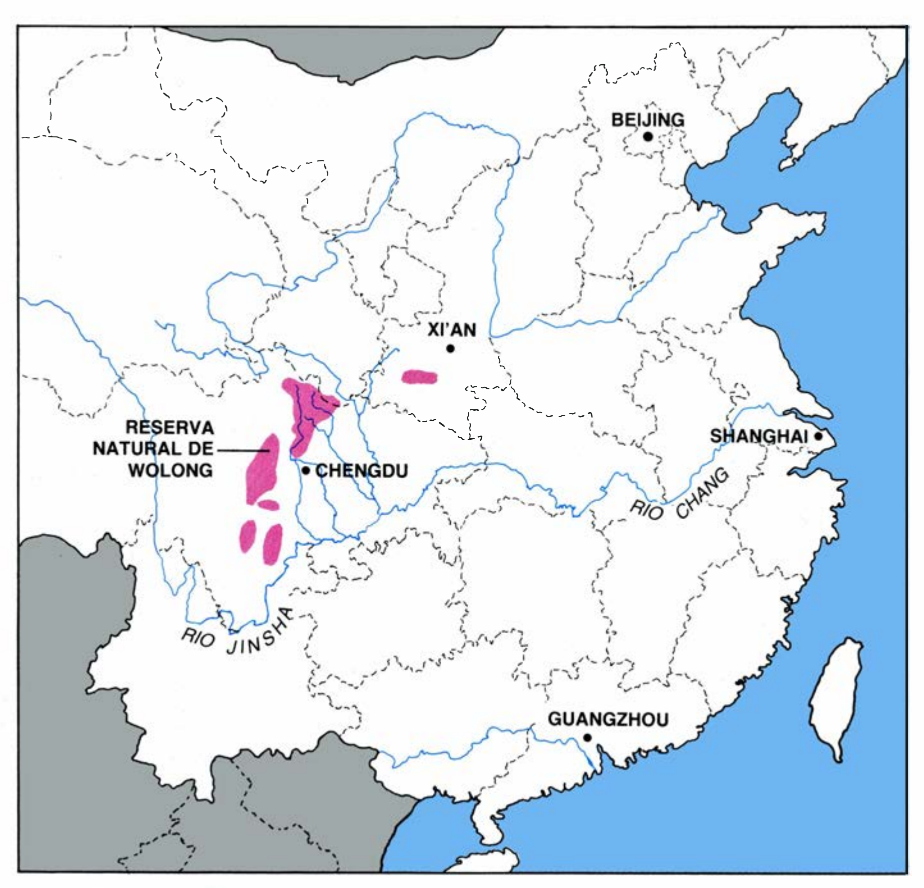
Uno de los problemas que plantea la identificación de un carácter homólogo es que son contados los casos en los que se conoce su base genética. Puede sobrevenir un cambio morfológico pequeño a raíz de una amplia reorganización de múltiples genes, que constituye un salto evolutivo importante en la escala molecular. Por el contrario, un cambio estructural muy conspicuo (como la aparición de un pulgar oponible en el panda) puede ser fruto de modificaciones genéticas pequeñas.

Si un carácter compartido por dos o más especies es análogo, la similitud entre esas especies constituye un caso de convergencia: el proceso mediante el cual aparecen, en organismos no emparentados, estructuras afines en respuesta a un mismo ambiente. Las alas de las aves y de los insectos son ejemplo de convergencia; cumplen idéntica función, pero han surgido independientemente. Los caracteres convergentes no comparten un ascendente común, por lo que pueden velar el proceso deductivo y confundir al naturalista. Tal es el caso del panda gigante.

Semeja un oso, pero muchos de sus caracteres tienen muy poco de osunos. Como el panda menor, es predominantemente herbívoro y se alimenta, de manera casi exclusiva, de bambú; su imponente cabeza y dientes grandes y aplanados, sus mandíbulas, robustas al



pasan, erguidos, comiendo bambú, alimento que constituye casi en exclusiva su dieta. El panda menor (*izquierda*) es un mapache, no un oso; sin embargo, al igual que el gigante, se alimenta sobre todo de bambú; comparte con aquél algunos caracteres anatómicos, como los dientes moledores, con pluricúspides.



2. PROCEDE EL PANDA GIGANTE de China; medra en las zonas de bosque alpino (*color*) de la periferia de la meseta tibetana. La pérdida de hábitats, atribuible al crecimiento de la población humana, la deforestación y la desaparición cíclica de los bosques de bambú amenazan su supervivencia. Descritos en 1869 por el misionero francés Armand David, hoy no llegan al millar los individuos en esas regiones chinas.

igual que los músculos masticatorios, le proporcionan la capacidad de molienda necesaria para una dieta vegetariana fibrosa. Una de las características singulares del panda es ser la única especie conocida, monos antropomorfos aparte, dotada de pulgar oponible funcional. Ambas clases de pulgar son rigurosamente análogas; a diferencia del que presentan los primates (que es un quinto dedo modificado), el del panda es una prolongación del hueso sesamoide de la muñeca y actúa a modo de sexto dedo, que permite al panda deshojar los tallos de bambú con notable destreza. Sumado a otros, ese carácter ha dado lugar a una criatura parsimoniosa, especializada en posarse, erecta, sobre los cuartos traseros durante largo rato (hasta 10 o 12 horas al día), y comer bambú en un ambiente apacible, libre de depredadores.

El panda gigante es también un oso atípico por razones no directamente relacionadas con la alimentación. Por lo general, los osos alpinos hibernan: no así el panda gigante. (Se cree que el bambú no aporta suficiente energía para la hibernación.) Otra característica del panda que ha traído de cabeza a los taxónomos: sus sonidos vocales. No gruñe ni ruge, sino que bala, como una oveja. En el nivel celular, los biólogos se han quedado perplejos ante el número y la morfología de sus cromosomas, de los que posee 21 pares, más semejantes a los del panda menor (22 pares) que a los de los osos (37 pares).

Con mis colegas del Instituto Nacional del Cáncer empecé a interesarme por el problema de la genealogía del panda en 1983, cuando se nos pidió que determinásemos la paternidad de un cachorro de Ling-Ling, uno de los dos pandas del zoológico de Washington. La cuestión se había planteado a raíz de una curiosa circunstancia. Tras varios años de convivencia, Ling-Ling y su compañero Hsing-Hsing no se habían apareado nunca; tomóse, por tanto, la decisión de inseminar artificialmente a Ling-Ling con esperma de Chia-Chia, un panda del zoológico de Londres. Para asombro de propios y extraños, 24 horas antes de la proyectada inseminación, Ling-Ling se apareó por vez primera con Hsing-Hsing. Los funcionarios del parque decidieron no obstante llevar a cabo la inseminación artificial, y Ling-Ling recibió esperma de Chia-Chia además del que ya hubiera recibido de Hsing-Hsing. Se maximizaba de ese modo la probabilidad de que la fecundación tuviera éxito, pero a costa de ignorarse la paternidad del cachorro.

El recién nacido murió a las pocas horas del alumbramiento; fue fácil determinar su paternidad (como ocurre en el ser humano) mediante el método conocido como electroforesis en gel. Se aislaron diversas proteínas a partir de muestras hísticas del cachorro y se colocaron en una matriz de gel, donde se separaron exponiéndolas a un campo eléctrico. Comparando las pautas de separación del cachorro (las proteínas idénticas recorren la misma distancia en el gel) con las de Hsing-Hsing y Chia-Chia, se evidenció que el padre verdadero era precisamente Hsing-Hsing.

Fue entonces cuando nos planteamos si cabría emplear técnicas genéticas de ese estilo para obtener datos acerca de la genealogía del panda gigante. Si en la escala molecular el panda se pareciera más a los mapaches que a los osos, o a éstos más que a aquéllos, el dato constituiría una prueba convincente a favor de una u otra genealogía. Según las reglas de la homología, cabía esperar que las proteínas del panda gigante (y las secuencias de ADN que las determinaban) guardasen mayor semejanza con las de sus parientes más próximos. Nos dispusimos, por tanto, a comparar proteínas homólogas del panda gigante, el panda menor, el mapache y varios osos.

Para apreciar el significado de nuestros resultados, recordaremos aquí la hipótesis del "reloj molecular". Articulada originalmente en 1962 por Emile Zuckerkandl y Linus Pauling, a la sazón en el Instituto de Tecnología de California, esa hipótesis, sencilla y convincente, parte de la premisa según la cual el material genético de poblaciones reproductivamente aisladas va divergiendo con el transcurso del tiempo. Las poblaciones se van distanciando porque su ADN (el material hereditario) sufre mutaciones estocásticas que se transmiten a ulteriores generaciones. Las mutaciones pueden afectar a regiones del ADN que determinan aminoácidos (los sillares de las proteínas), o pueden interesar regiones no codificadoras, esto es, que no tienen efecto manifiesto sobre la composición del organismo. En todo caso, y acumulándose con el tiempo, la amplitud de las discrepancias entre dos especies —en la secuencia nucleotídica del ADN

o en la secuencia aminoacídica de una proteína— constituye un buen indicador de su parentesco. A partir de esa información, los genetistas pueden estimar el momento aproximado en que las dos especies se separaron a partir de un antepasado común.

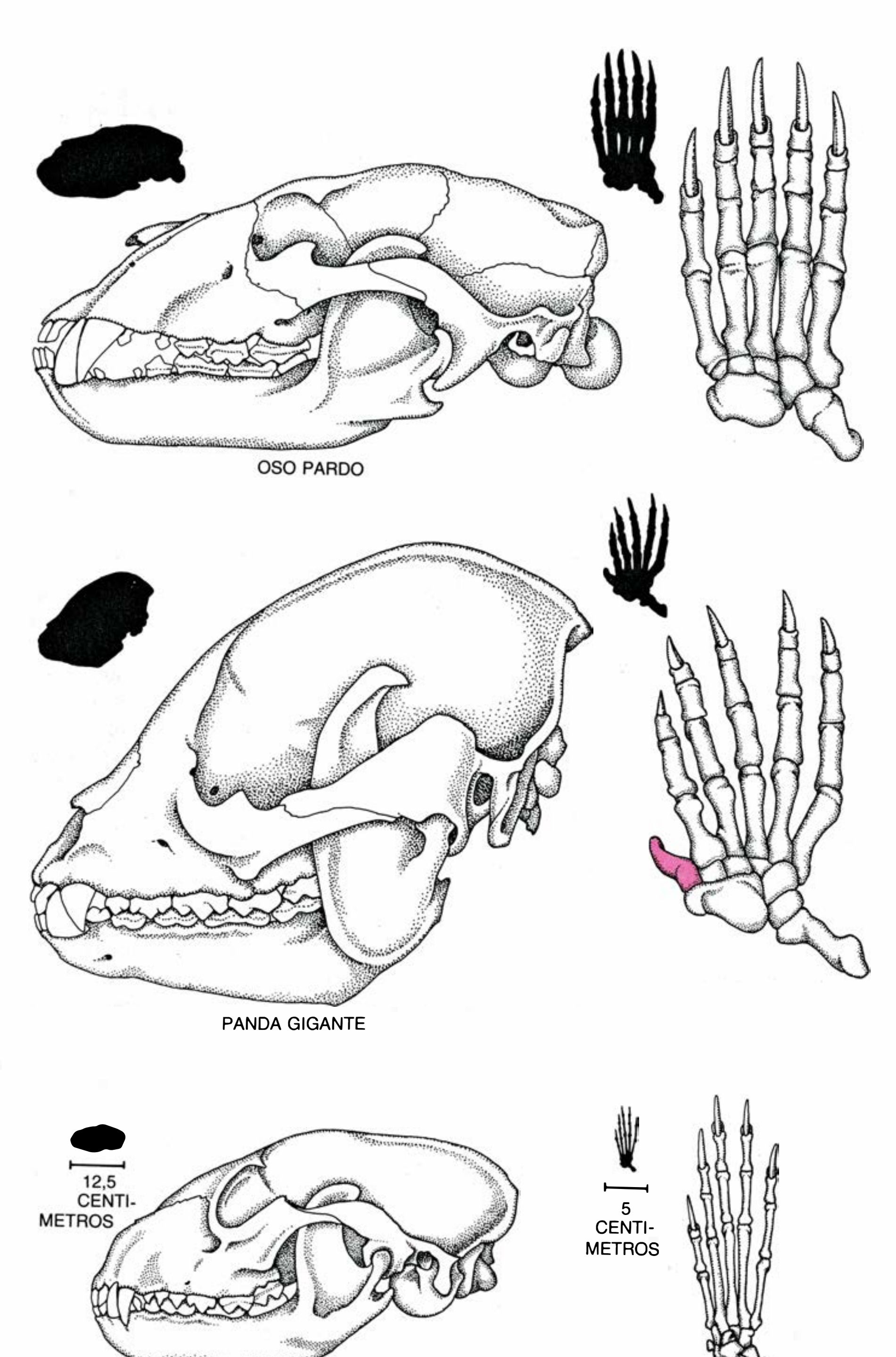
La hipótesis del reloj molecular se convirtió en piedra angular de una disciplina biológica de nuevo cuño: la evolución molecular. A salvo de ciertas reservas (el ritmo de acumulación de mutaciones varía entre moléculas y no tiene por qué ser igual en todas las especies), la mayoría de los biólogos admite que los genes mutan de un modo uniforme a lo largo del tiempo. Por esa razón, los datos moleculares pueden resultar un valioso complemento de otros métodos, más tradicionales, de la investigación taxonómica.

Iniciamos nuestras investigaciones sobre la genealogía del panda gigante recogiendo muestras de sangre y de piel de seis especies de la familia Ursidae (oso pardo, polar, negro asiático, negro americano, malayo y oso bezudo) y tres de la familia Procyonidae (panda menor, mapache y kinkajú).

Los primeros análisis se realizaron con la técnica de hibridación de ADN. Se cultivan fibroblastos (tipo celular de elección porque en cultivo se divide rápidamente) de las especies seleccionadas en un medio que contiene nucleótidos radiactivos. Al duplicarse, las células incorporan los nucleótidos marcados en el ADN de nueva síntesis. Acto seguido se mezclan, in vitro, filamentos aislados de ADN radiactivo de una especie con los de ADN no radiactivo de otra. Se permite la formación de moléculas de ADN híbrido bicatenario y se evalúa la amplitud de la hibridación midiendo la radiactividad del ADN recién formado. La homología de las secuencias del ADN de las dos especies viene indicada por la temperatura a la cual las moléculas híbridas se abren al someterlas al calor. Esa temperatura de fusión resulta ser inversamente proporcional a las diferencias de composición de los dos filamentos de ADN que constituyen la molécula híbrida.

Raoul E. Benveniste, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, preparó una matriz de temperaturas de fusión de las hibridaciones entre panda gigante y sus parientes. Valiéndonos de esos datos, y de los principios de la hipótesis del reloj molecular, elaboramos un diagrama filogenético (una clasificación que plasma el parentesco evolutivo entre organismos). Según nuestros cálculos, los prociónidos fueron los primeros en desgajarse del antepasado común de las familias del oso y del mapache; poco después, el panda menor se separaba del tronco principal de la familia del mapache. Y lo que quizá sea más importante: el panda gigante posee un parentesco más estrecho con los osos que con los mapaches.

Los resultados nos merecían toda la confianza, pero había que profundizar en el análisis. Había que verificar su coherencia: ¿se obtendría la misma filogenia con otros métodos y otras moléculas? Aplicamos la electroforesis en gel, una de las técnicas que habíamos empleado para establecer la paternidad del cachorro de Ling-Ling. Queríamos medir la semejanza genética comparan-



3. ANATOMIA del panda gigante, que difiere considerablemente de la de sus parientes, los osos y mapaches. Su cráneo, voluminoso, constituye una adaptación al régimen alimentario herbívoro: ha crecido para brindar mayor fuerza de molienda con que macerar el bambú. El pulgar oponible, formado por la prolongación de un hueso de la muñeca (*color*) permite al panda arrancar las hojas de los tallos de bambú. Muchas de esas especializaciones han confundido a los taxónomos que estudian el parentesco evolutivo del panda.



4. CROMOSOMAS CARACTERISTICOS del panda gigante, *Ailuropoda melanoleuca*. Considerados antaño un argumento de peso para excluir a los pandas de la misma familia de los osos, se ha comprobado que son fruto de una simple fusión cromosómica. El análisis detallado de las bandas revela que los cromosomas del panda proceden de un oso ancestral (hoy extinto) cuyos cromosomas se fusionaron, al parecer, extremo con extremo; el centrómero actúa como punto de conexión central. Se comparan cromosomas representativos (1-3) del panda gigante (*en cada par, el de la izquierda*) con sus homólogos del oso pardo, *Ursus arctos* (*en cada par, el de la derecha*). En la primera fotografía de cada cromosoma, el del panda está apareado con un homólogo; en la siguiente está invertido 180 grados y apareado con su segundo homólogo. El emparejamiento de las bandas permite determinar, por ejemplo, que una de las mitades del cromosoma 1 del panda gigante es homóloga del cromosoma 2 del oso pardo, y que la otra lo es del cromosoma número 3 del oso.

do las diferencias que, por mutación, registraban los genes que determinaban isozimas, esto es, versiones distintas de enzimas homólogas. Se cotejaron las movilidades relativas de unas 50 enzimas homólogas de nueve especies y se estimó la "distancia genética" (el número medio de diferencias mutacionales por gen) entre los representantes de las diversas especies.

Hallamos (después de compensar la limitada resolución de la electroforesis y las frecuencias relativas de substitución aminoacídica) que la distancia genética entre especies era proporcional a la duración del aislamiento reproductivo entre las mismas. A partir de las distancias genéticas apuntadas por las isozimas, trazamos un diagrama filogenético que resultó ser estructuralmente equivalente al árbol obtenido por hibridación del ADN. La concordancia independiente de los dos árboles —el de ADN y el de las isozimas— incrementó nuestra confianza en ellos y en la validez del reloj molecular.

Nuestra atención se centró seguidamente en la electroforesis bidimensional, otra técnica molecular. También aquí se determina la migración de las proteínas en un gel, pero este método permite comparar simultáneamente gran número de muestras (más de 300). Cabía estimar la distancia genética entre varias especies tomando de referencia el grado de disparidad de sus respectivos perfiles proteínicos. Le pedí a David Goldman, del Instituto Nacional estadounidense de la Salud Mental, que analizara las proteínas de los fibroblastos del panda gigante y de sus parientes. Sus resultados corroboraron plenamente nuestros hallazgos anteriores.

Como confirmación última de la fiabilidad de nuestro diagrama filogenético, comparamos nuestros resultados con los de Vincent M. Sarich, de la Universidad de California en Berkeley, que en 1973 había realizado una serie de pruebas inmunológicas en el panda y sus parientes. En esas pruebas se estima la distancia evolutiva entre especies cotejando el alcance de la reacción de una proteína sérica (como la albúmina) de una especie con los anticuerpos producidos contra esa proteína por otra especie distinta. Cuantas menos moléculas de anticuerpo se fijen, menor será el parentesco entre las especies. Aunque los resultados de Sarich eran ambiguos para el panda menor, concordaban muy bien con lo que mis colegas y yo habíamos encontrado en el panda gigante: que estaba más emparentado con los osos que con los mapaches.

Aclarada la coherencia de nuestros datos, teníamos que poner en hora el reloj molecular calibrando el árbol filogenético con datos obtenidos del registro fósil. Ello resulta imprescindible si se quiere determinar la cronología de los puntos de ramificación del árbol. Conocíamos cuál era el grado de parentesco mutuo, pero ignorábamos en qué momento de la historia de la Tierra divergieron y se escindieron en linajes independientes.

Para calibrar un árbol evolutivo basado en datos moleculares pueden correlacionarse la tasa de evolución molecular del grupo pertinente (en este caso nueve especies del orden Carnivora) con un segundo grupo no emparentado, como los primates, cuyas moléculas proteínicas presentan una tasa de evolución similar a la de los carnívoros y cuya historia fósil está bien documentada. Demuéstrese que dos especies de primates guardan la misma distancia molecular que dos especies de oso, y podrá suponerse que ambos grupos divergieron aproximadamente al mismo tiempo. En otras palabras, si lográbamos demostrar que la molécula de albúmina difería tanto entre el oso negro y el oso malayo como entre el gorila y el chimpancé, habría que admitir que esos grupos se separaron poco más o menos en el mismo momento geológico.

Repetimos en diversas especies de primates los mismos análisis moleculares que habíamos realizado en el panda. Nuestros datos coincidieron con los obtenidos por otros genetistas que habían estudiado la evolución molecular de los primates, lo que validó la exactitud de los análisis realizados por nuestro equipo. Dando por buena la estimación de que los antropomorfos africanos y el hombre divergieron hace 35 millones de años, concluimos que los úrsidos modernos se habían separado en un linaje independiente de los prociónidos modernos hace entre 30 y 50 millones de años.

A los 10 millones de años de ese acontecimiento, el grupo de los prociónidos se había escindido en dos: los prociónidos del Viejo Mundo (los que viven en Europa, Africa y Asia), representados hoy por el panda menor, y los prociónidos del Nuevo Mundo (que habitan en ambos hemisferios americanos), representados por el coatí, el cuataquil y el kinkajú. Por la época en que los gibones se separaban de los grandes antropomorfos (hace entre 18 y 25 millones de años), los antepasados del panda gigante lo hacían del tronco principal de los úrsidos. Tal acontecimiento sobrevino unos 20 millones de años después de producirse la separación inicial de los linajes de los úrsidos y los prociónidos. El oso pardo, el negro, el bezudo y el malayo divergieron entre sí hace entre 6 y 10 millones de años.

Si bien nuestros datos moleculares parecían zanjar definitivamente la cuestión de la genealogía del panda, no nos permitían encajar la última pieza del rompecabezas: el extraño aspecto de los cromosomas del panda gigante. Los osos del género *Ursus* portan 74 cromosomas monobraquiales, es decir, de un solo brazo, con el centrómero en un extremo. En cambio, el panda gigante sólo tiene 42 cromosomas, en su mayoría bibraquiales. Para algunos biólogos, tal diferencia probaba por sí sola que el oso y el panda no pertenecían a la misma familia.

Empezábamos ya a recelar de la va-

lidez de esa conclusión, por lo que pedí a mi colega William G. Nash, del Instituto Nacional del Cáncer, que sometiera a nuevo examen los cromosomas del panda gigante. Poco tiempo antes, Nash había puesto a punto técnicas especiales para el estudio del bandeo claro y oscuro de los cromosomas: se cultivan células en presencia de un retrovirus que transforma las células normales, de división lenta, en células de división rápida y se examinan los cromosomas inmediatamente antes de iniciarse la metafase mitótica, cuando mejor pueden teñirse para poner de relieve, con primoroso detalle, esa estructura en bandas.

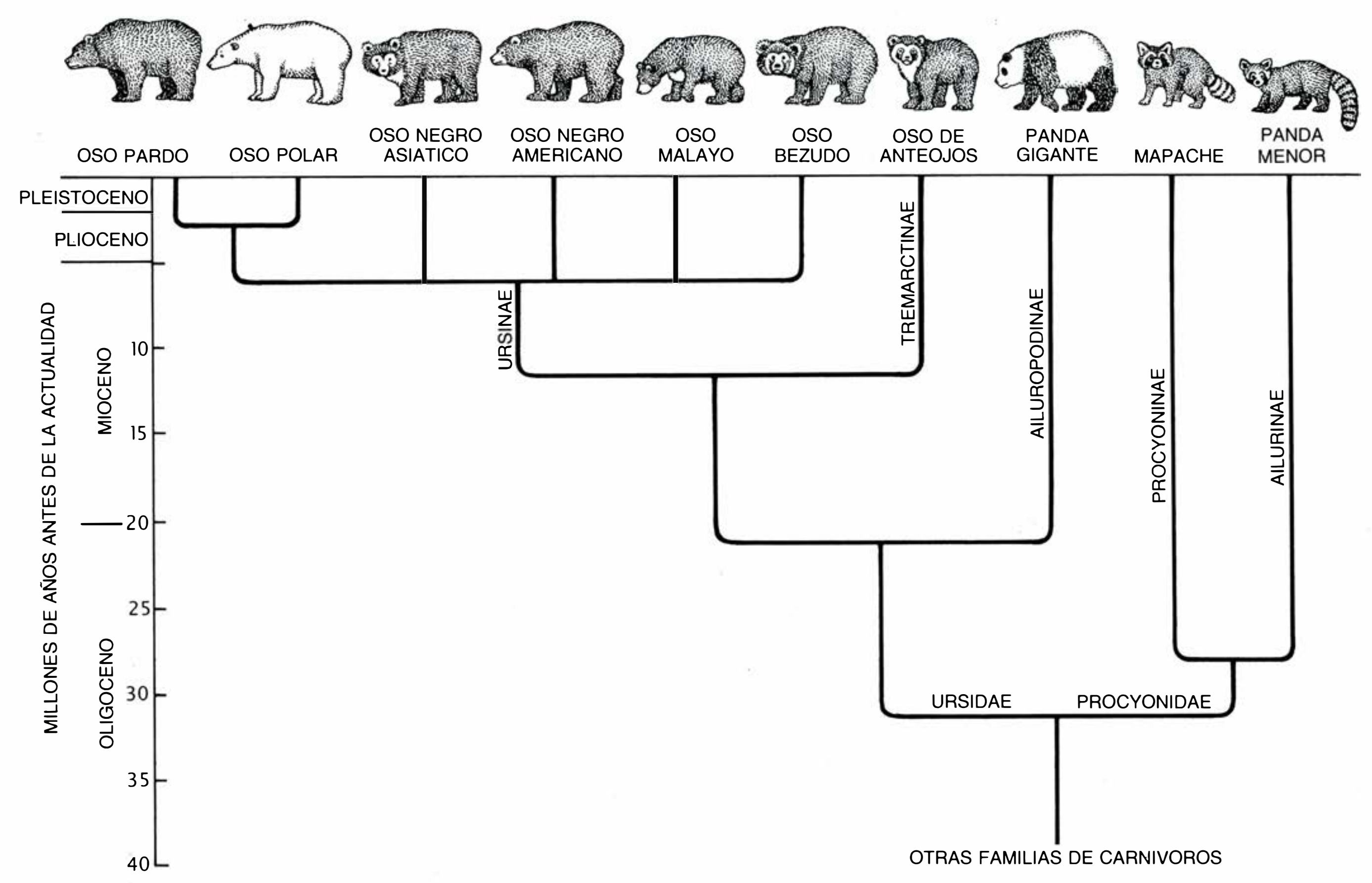
Al comparar los cromosomas del panda gigante con los de seis osos *Ursus*, Nash hizo un descubrimiento sorprendente: el bandeo de las seis especies de oso era casi idéntico al observado en los brazos de los cromosomas del panda gigante. Concluimos que los cromosomas del panda gigante eran pares de cromosomas de oso unidos cabeza con cabeza por un centrómero común. Lo que parecía una reorganización cromosómica general era, en realidad, una simple fusión de cromosomas en la línea evolutiva que conduce al panda gigante.

Con estos resultados en la mano, nos encontrábamos en condiciones de aventurar una conclusión definitiva, a saber, que el panda gigante pertenece, junto con los osos, a la familia Ursidae, y que el panda menor forma parte, con el mapache, de la familia Procyonidae. El panda gigante y el panda menor divergieron de sus correspondientes antepasados en época muy temprana de la historia de su respectiva familia, por lo que creemos justificado que se les otorgue la categoría de subfamilia a ambos.

Además, creemos que nuestros datos arrojan nueva luz sobre el ritmo de la evolución. Se ha citado el panda gigante como paradigma de evolución rápida (o "puntuada"), porque se creía que su separación de los osos era relativamente reciente. Nuestros resultados, sin embargo, indican que el panda se independizó de sus antepasados osunos hace entre 15 y 25 millones de años. Si tal datación, más antigua, se demuestra correcta, se avienen más con el gradualismo: la evolución acontece de resultas de cambios pequeños, graduales.

Durante la investigación, me impresionó la potencia de los datos moleculares para resolver problemas de filiación evolutiva. Conviene señalar que esos datos tienen limitaciones en al menos dos aspectos. Primero, no pueden medir el tiempo en términos absolutos, por lo que han de calibrarse mediante el registro fósil. Segundo, puesto que la mayoría de las mutaciones son aleatorias, apenas nos orientan sobre las fuerzas selectivas responsables del cambio morfológico.

A pesar de ello, somos del parecer de que el análisis molecular brinda una aproximación objetiva a los problemas taxonómicos y proporciona pruebas complementarias susceptibles de combinarse con los datos anatómicos o etológicos tradicionales para alcanzar una interpretación más precisa del parentesco entre especies. En el caso del panda gigante, el reloj molecular nos permitió zanjar definitivamente la cuestión de la verdadera genealogía de este animal y, con ello, resolver un problema que había intrigado a los taxónomos durante más de un siglo.



5. ARBOL FILOGENETICO basado en los datos obtenidos con métodos moleculares. Sitúa el panda gigante en los Ursidae, la familia del oso. Dentro de esa familia, el panda se aparta lo suficiente para justificar su colocación en una subfamilia propia, los Ailuropodinae. El panda menor continúa en los Procyonidae, la familia del mapache, donde se le otorga asimismo la categoría de subfamilia. El reloj molecular, calibrado en valores absolutos por comparación con estimaciones bien documentadas, indica que la familia del oso y la del mapache divergieron de un antepasado común hace entre 35 y 40 millones de años.

Demonios, motores y la segunda ley

Desde 1871, los físicos se vienen afanando por resolver el problema del demonio de Maxwell, criatura que viola la segunda ley de la termodinámica. La teoría de la computación ofrece ya una solución del problema

Charles H. Bennett

El frigorífico, dispositivo que crea desigualdades de temperatura en un sistema, necesita energía para funcionar. Esta necesidad la impone la segunda ley de la termodinámica. Recíprocamente, se puede emplear una diferencia de temperatura para obtener trabajo útil; por ejemplo, una máquina de vapor, que se apoya en la diferencia de temperatura entre caldera y condensador. Ya en 1871, el físico escocés James Clerk Maxwell sugirió, en su *Teoría del calor*, que una criatura suficientemente pequeña que pudiera ver y manejar moléculas individuales se hallaría exenta del cumplimiento de esta ley. Sería, pues, capaz de crear y mantener diferencias de temperatura en un sistema sin realizar trabajo:

"...si concebimos un ser cuyas facultades estén tan desarrolladas que pueda seguir la trayectoria de todas las moléculas, esta criatura, con unos atributos que no se saldrían de nuestro dominio finito, sería capaz de hacer lo que actualmente nos es imposible realizar a nosotros mismos. Se ha visto que las moléculas encerradas en un recipiente lleno de aire a temperatura uniforme se mueven con velocidades que no son uniformes en absoluto... Supongamos ahora que dividimos el recipiente en dos mitades, A y B, mediante una pared en la que hemos abierto un pequeño orificio, y que este ser, que puede ver las moléculas una a una, abre y cierra el agujero y deja pasar, de A a B, sólo las más rápidas y, de B a A, las más lentas. Procediendo de este modo, sin consumir trabajo, eleva la temperatura de B y baja la de A, en contradicción con la segunda ley de la termodinámica."

Este "ser" no tardó en convertirse en el demonio de Maxwell, habida cuenta de los efectos subversivos que sus actividades implicaban en el orden natural de las cosas. Entre sus efectos, el más importante era la abolición de la necesidad de fuentes de energía, como el petróleo, el uranio o la luz solar. Cualquier motor funcionaría sin batería, sin depósito de combustible y sin conexión a la red eléctrica. El demonio posibilitaría que una máquina de vapor funcionase continuamente sin combustible por ejemplo, manteniendo la caldera de la máquina perpetuamente caliente y su condensador perpetuamente frío.

Para salvaguardar la segunda ley, los físicos han avanzado distintas razones por las que el demonio no podría actuar como Maxwell lo describió. Pero casi todos esos argumentos han fracasado. Muchas veces las objeciones llegaron de los avances en otros campos de la física; bastantes investigadores creyeron (incorrectamente como después se ha visto) que las limitaciones que impone la teoría cuántica invalidaban el demonio de Maxwell.

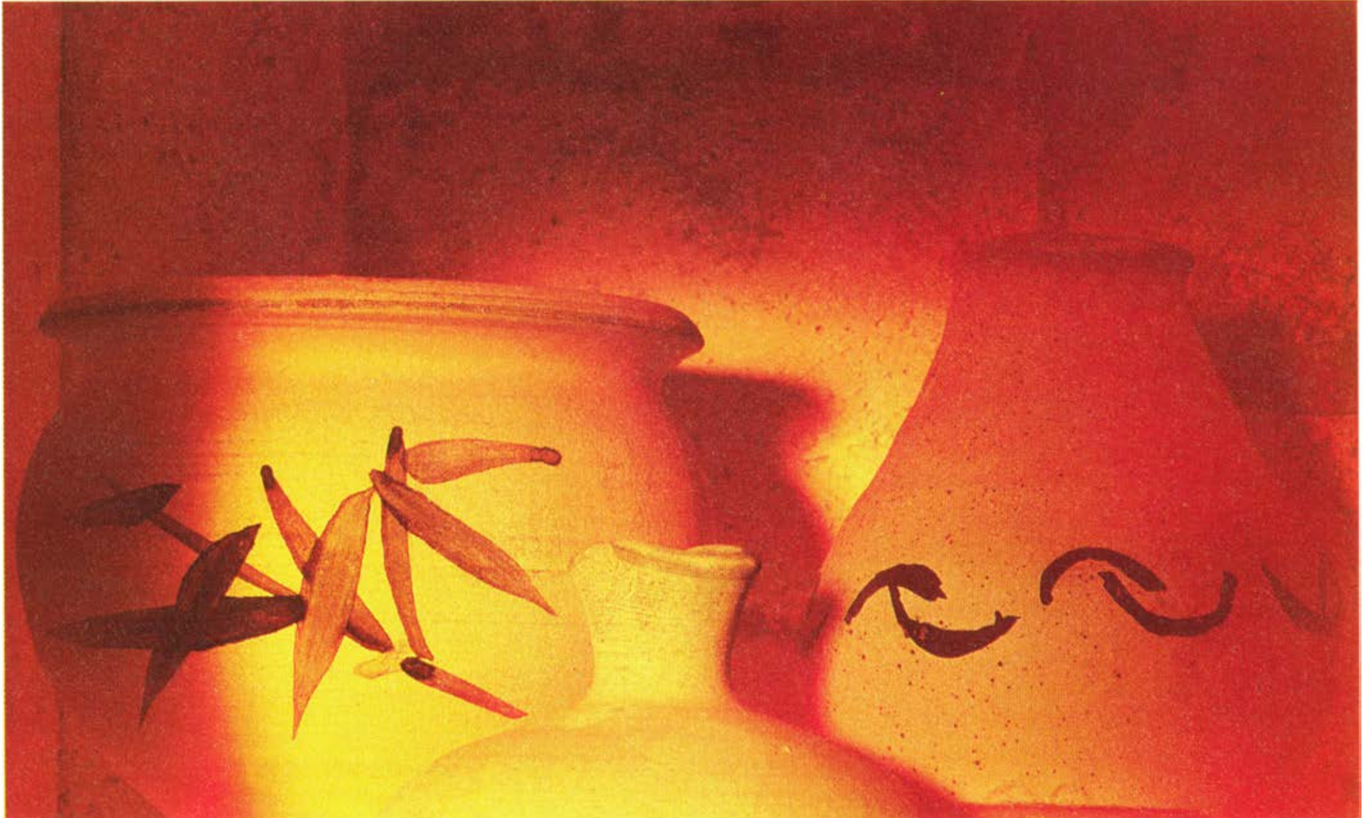
La respuesta correcta —la verdadera razón por la que el demonio de Maxwell no viola la segunda ley— se ha descubierto recientemente gracias a los trabajos realizados en una línea de investigación muy distinta: el estudio de los requerimientos energéticos de los ordenadores.

Desde los tiempos de Maxwell se han propuesto numerosas versiones del demonio. En una de las más sencillas, el demonio crea una diferencia de presión (en vez de una diferencia de temperatura) y permite el paso de todas las moléculas, sean lentas o rápidas, de B hacia A, pero impide el tránsito de A a B. Con el tiempo, la mayor parte de las moléculas estarían concentradas en A y se habría creado un vacío parcial en B. Este ser es incluso más plausible que el original de Maxwell, ya que no tiene que ver ni que pensar. No es inmediata la razón por la que este demonio —en esencia una válvula unidireccional para moléculas— no puede materializarse en un dispositivo inanimado simple, una diminuta trampilla con un muelle, por ejemplo.

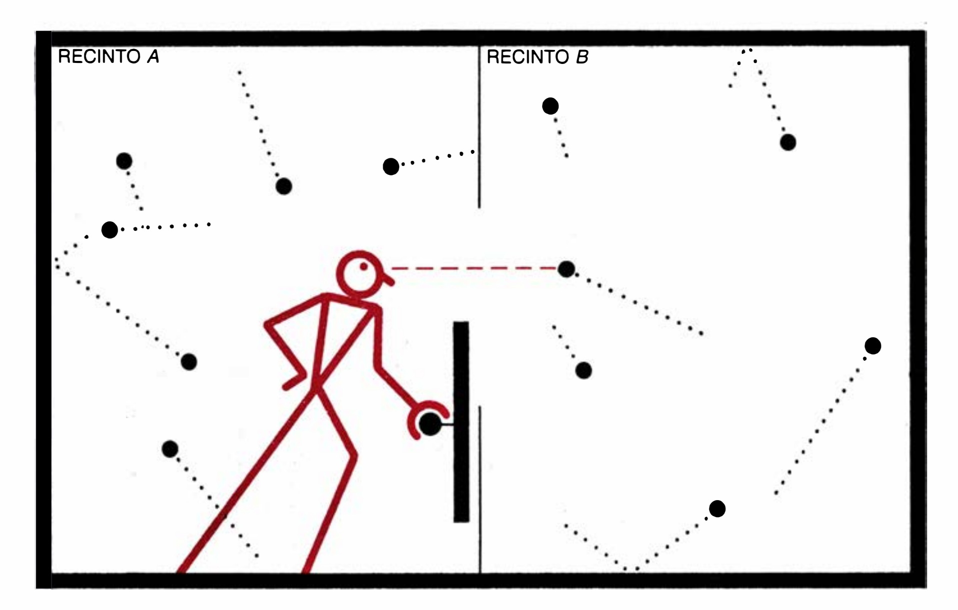
Al igual que el diablillo de Maxwell, el "demonio de la presión" supondría una fuente de energía inagotable para los motores. A modo de ejemplo, los martillos neumáticos usados frecuentemente para reparar el firme de las calles funcionan con aire comprimido de un depósito que se mantiene lleno gracias a un compresor de gasolina. Una simple válvula unidireccional para moléculas de aire haría las funciones del compresor, llenando el depósito con aire de los alrededores sin ningún esfuerzo.

Se podría pensar erróneamente que un sistema como el descrito viola la ley de conservación de la energía (conocida también como primera ley de la termodinámica). Pero no hay tal. La energía usada para perforar el hormigón procede del calor del aire reunido por la válvula unidireccional. Por tanto, el funcionamiento de la máquina provoca que el aire se enfríe. La primera ley no prohíbe en absoluto el funcionamiento de un motor que satisfaga todas sus necesidades energéticas con el calor ambiente de su entorno o incluso con el calor liberado por su propio rozamiento y por su escape. Lo que prohíbe estos motores es la segunda ley.

Para analizar con profundidad las acciones del demonio, hay que entender



1. RESPLANDOR UNIFORME de un horno caliente (*arriba*) Pone de manifiesto una consecuencia de la segunda ley de la termodinámica: es imposible distinguir los objetos de un recipiente sometidos a una temperatura uniforme sin disponer de una fuente luminosa externa a temperatura más elevada que la del ambiente. En un recipiente a temperatura uniforme los cuerpos emiten luz de la misma intensidad y del mismo color (incluso en cuerpos con diferentes reflectancias y colores). La razón estriba en que, si un cuerpo apareciera más oscuro que su entorno, absorbería energía a expensas de sus vecinos y, en consecuencia, se calentaría y sus vecinos se enfriarían. De acuerdo con la segunda ley, los cuerpos que se hallan a la misma temperatura no pueden adquirir, espontáneamente, diferentes temperaturas. (En la fotografía se puede percibir cierto contraste, ya que el interior del horno no está a temperatura uniforme.) Con una fuente luminosa externa se perciben las diferencias de reflectancia intrínsecas (*fotografía inferior*). (Cortesía de James Kilkelly y R. Brune Laughlin.)



2. DEMONIO DE MAXWELL, descrito en 1871 por James Clerk Maxwell. Diríase que viola la segunda ley de la termodinámica. El demonio controla una puerta corredera que bloquea una abertura de una pared que separa dos recintos que contienen un gas con la misma temperatura y presión a ambos lados. El demonio observa las moléculas que se acercan al agujero; abre o cierra la puerta permitiendo el paso de las moléculas que se mueven más rápido desde el recinto A al B, pero no al revés. A las moléculas cuyo movimiento es lento, sólo les permite el paso de B hacia A. Gracias a la ordenación producida por este ser, B se calienta y A se enfría. De acuerdo con la segunda ley, se requiere cierta cantidad de trabajo para crear una diferencia de temperatura. El trabajo necesario para mover la puerta corredera puede hacerse arbitrariamente pequeño.

antes algunas sutilezas de la segunda ley. Aunque expresada en un principio como una restricción de las posibles transformaciones de calor y trabajo, la segunda ley se considera ahora una manifestación del incremento del desorden del universo. De acuerdo con la segunda ley, la entropía o desorden del universo entero no puede disminuir. Eso significa que sólo caben dos tipos de sucesos: aquellos en los que la entropía del universo crece y episodios en los que ésta permanece constante. A los primeros se les denomina procesos irreversibles, porque su inversión implicaría una violación de la segunda ley; los segundos constituyen los procesos reversibles. La entropía de un sistema disminuye si se realiza trabajo sobre él, pero al efectuar dicho trabajo incrementaría, en una cantidad igual o mayor, la entropía de otro sistema (o del entorno del primer sistema).

Un proceso irreversible clásico, que ayuda a definir el concepto de entropía de una forma más precisa, es el de expansión libre. Supongamos una cámara llena de un gas dividida por una pared de otra sala de igual volumen donde se ha producido el vacío. Si se abre un agujero en la pared, se escapará gas (es decir, se expandirá libremente) hacia la zona que antes estaba vacía, hasta que ambas cámaras queden equilibradas.

La razón por la que las moléculas acaban llenando ambos recintos es más matemática que física, si se nos permite esta distinción. El número de moléculas a ambos lados de la división tiende a igualarse, no porque exista una mutua repulsión, y propendan a alejarse, sino porque sus frecuentes colisiones contra las paredes del recinto y entre sí tienden a distribuirlas al azar por el espacio disponible, hasta que la mitad se halla en un lado del muro y la otra mitad en el otro lado.

Al deberse al azar y no a la repulsión la difusión de las moléculas, existe una probabilidad de que todas ellas puedan simultáneamente volver a la zona de donde partieron. Ahora bien, si hay n moléculas, la probabilidad de que todas vuelvan a su recinto de origen es la misma que la probabilidad de que al lanzar n monedas al aire caigan todas de "cara": $1/2^n$. Por tanto, para el número de moléculas con el que se suele trabajar (en un gramo de hidrógeno 300.000.000.000.000.000.000.000) la expansión libre es en realidad un proceso irreversible: un proceso cuya reversibilidad espontánea, aunque posible, es tan improbable que se puede decir con todo seguridad que nunca se observará.

El estado desordenado —aquel en que el gas se había difundido en los dos recintos, contrapuesto a aquel en que el gas ocupaba sólo uno de ellos— resulta más probable que el estado ordenado. Es decir, hay más configuraciones de moléculas en las que se ocupan ambos recintos, de la misma forma que, al echar al aire 100 monedas, hay más formas de obtener 50 caras y 50 cruces que no 100 caras y ninguna cruz. Al decir que la entropía del universo tiende a crecer, la segunda ley proclama que el universo tiende a evolucionar con el discurrir del tiempo hacia los estados más probables.

¿Puede cuantificarse este concepto? En otras palabras, ¿puede decirse cuánto ha incrementado el gas su desorden después de distribuirse de manera igualitaria por los dos recintos? Consideremos una molécula simple en el gas. La molécula que se mueva por todas las zonas gozará del doble de posibles posiciones que otra que lo haga sólo en un recinto: hay el doble de formas en que la molécula ocupa los recintos del sistema. Si hay dos moléculas en un sistema con dos zonas, cada molécula tiene el doble de oportunidades de distribuirse que si se hallara en un solo recinto y, por tanto, el sistema global tiene 2x2, o sea, cuatro veces más configuraciones posibles. Si hay tres moléculas, el sistema tendrá 2x2x2 (ocho) posibles configuraciones más.

En general, si en el gas hay n moléculas, el gas puede ocupar los dos recintos de 2^n formas más que si ocupara uno solo. Se dice así que el gas tiene 2^n veces más estados accesibles que el gas confinado en un solo recinto. E igualmente, el número de estados accesibles en la mayoría de sistemas depende exponencialmente del número de moléculas.

La entropía de un sistema se define, por consiguiente, como el logaritmo del número de estados accesibles. En el ejemplo que nos ocupa, el producto por 2^n por el número de estados corresponde a un incremento en la entropía de n bits, o unidades binarias. (La base del logaritmo —y por lo tanto el tamaño de las unidades de entropía— es arbitraria; por convencion se elige base 2 y unidades binarias.) La escala logarítmica tiene la ventaja de hacer que la entropía de una muestra material, al igual que su energía y su masa, sea proporcional al número de moléculas que contiene. Se puede establecer una analogía con la memoria de un ordenador: el tamaño, el peso y el costo de una memoria de n bits son, en términos generales, proporcionales a n, mientras que el número de distintos estados posibles en la memoria es 2^n.

Las primeras formulaciones de la segunda ley no mencionaban el azar ni el desorden; se referían al calor, trabajo

y temperatura. ¿Cómo pueden relacionarse estos conceptos con nuestra definición cuantitativa de entropía?

Las moléculas de cualquier muestra de materia se hallan siempre en movimiento. La velocidad y la dirección de cada molécula están distribuidas al azar, pero la velocidad promedio de las moléculas es proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura de la muestra (medida a partir del cero absoluto). Cuando se eleva la temperatura de una muestra (se incrementa la velocidad promedio), las velocidades de las moléculas individuales pasan a distribuirse en un intervalo mayor que cuando la velocidad promedio era menor.

Si la velocidad promedio es alta, cada molécula de la muestra tiene una escala de velocidades accesible para ella mayor, de la misma forma que una molécula de un sistema con dos recintos tiene accesible un número mayor de posiciones que una molécula que se mueva por uno solo de ellos. De este modo, hay más estados accesibles a altas temperaturas que a temperaturas bajas. El movimiento se hace más desordenado a altas temperaturas, pues es más difícil predecir la velocidad de cualquier molécula.

A la hora de determinar la entropía de un sistema deben tenerse en cuenta el desorden del movimiento molecular y el desorden en las posiciones moleculares. La entropía de un gas crece tanto cuando el gas ocupa un volumen mayor como cuando incrementa su temperatura, ya que su movimiento molecular se torna más desordenado.

Cualquier flujo de calor lleva consigo entropía. Para ser precisos, porta una cantidad de entropía proporcional a la cantidad de calor que fluye dividido por la temperatura a la que se produce el flujo. Por consiguiente, el flujo de calor desde un cuerpo caliente hacia un cuerpo frío eleva la entropía del cuerpo frío, y lo hace en una cuantía superior que la empleada para rebajar la del cuerpo caliente: la misma cantidad de calor es la que va del cuerpo caliente al cuerpo frío, pero, en términos de descenso de entropía, en el cuerpo caliente se divide por una temperatura alta, mientras que en el cuerpo frío la misma cantidad de calor se divide por una temperatura menor. De este modo, el flujo de calor desde un cuerpo caliente hasta un cuerpo frío incrementa la entropía global del universo.

Esta definición más precisa de la entropía nos permite comprender mejor por qué el demonio de Maxwell parece violar la segunda ley. Mediante su selección, el demonio produce un flujo de calor desde A hacia B, incluso cuando el recinto B esta ya más caliente que el A. De este modo, el demonio rebaja la entropía de A en mayor cantidad que eleva la entropía de B. Así, el demonio disminuye la entropía del universo globalmente: una imposibilidad termodinámica.

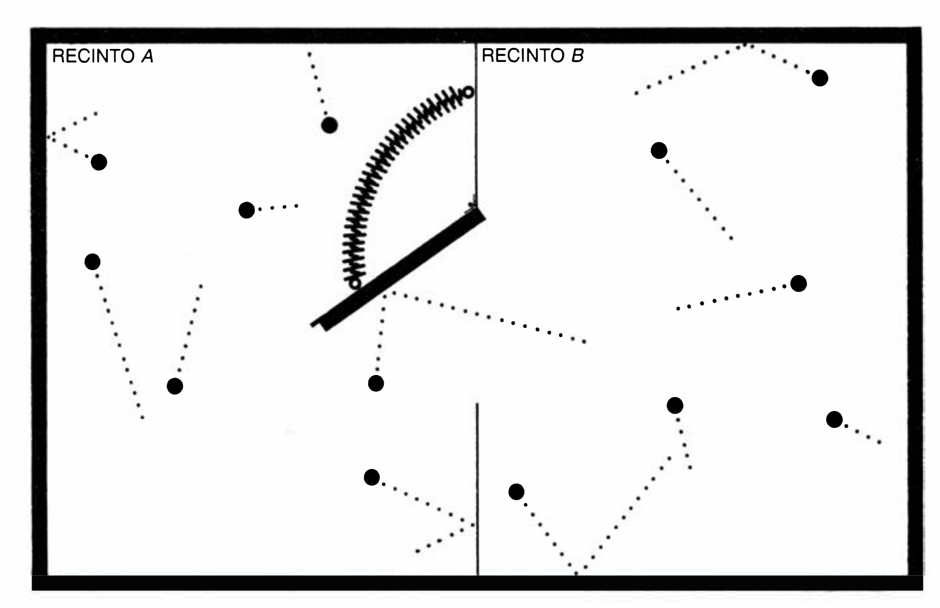
En su descripción del demonio, Maxwell aclaró que él creía en la validez de la segunda ley. Sugirió también que quizá los seres humanos no pueden violar la segunda ley (realizando la misma tarea que los demonios) por la sencilla razón de que carecen de la capacidad del demonio para ver moléculas individuales. Pero este exorcismo no ahuyenta al diablo; antes bien, deja abierta la cuestión en el sentido de que, si existiera un ser con la capacidad de ver y manejar las distintas moléculas, podría violar la segunda ley.

Una forma de descubrir por qué razón el demonio de Maxwell resulta inviable consiste en analizar y rechazar diversos dispositivos, simples e inanimados, que podrían comportarse como demonios; por ejemplo, la trampilla con un muelle a la que nos referíamos antes, que actúa como una válvula molecular unidireccional.

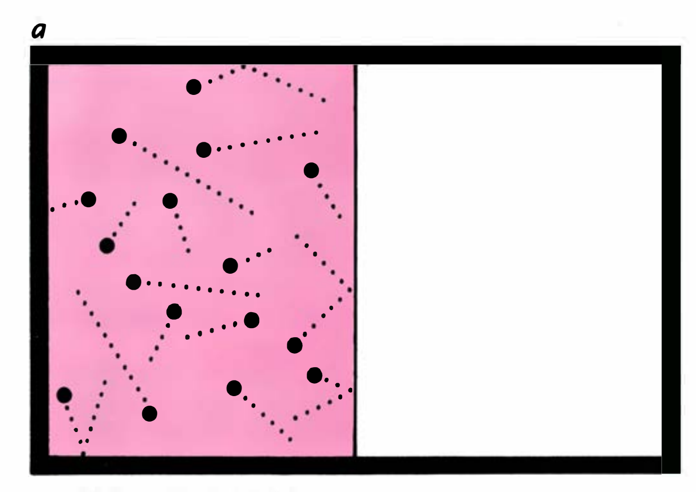
Imaginemos que la puerta se abre hacia la izquierda. Si el demonio trabaja según se supone ha de hacerlo cada vez que una molécula procedente del recinto de la derecha golpea la puerta, ésta se abre y la molécula entra en el recinto de la izquierda. Sin embargo, cuando una molécula de la izquierda choca con la puerta, ésta se mantiene cerrada, impidiendo su paso. Con el tiempo, todas las moléculas quedan atrapadas en el recinto de la izquierda, y el demonio ha comprimido el gas (reduciendo su entropía) sin realizar trabajo alguno.

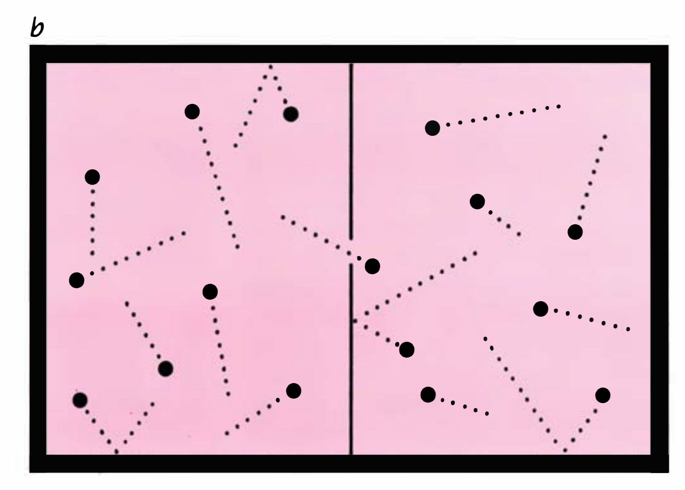
¿Cómo destruimos al demonio de la puerta? En primer lugar, el muelle de la puerta ha de ser bastante débil. El trabajo para abrir la puerta venciendo la fuerza del muelle ha de ser comparable a la energía cinética promedio de las moléculas del gas. En 1912, Marian Smoluchowski señaló que los repetidos choques de las moléculas con la puerta le dan a ésta su propia energía cinética de movimiento al azar (es decir, energía calorífica). La energía de la puerta debida a este movimiento viene a ser la misma que la de las partículas que chocan contra ella; por tanto, ésta se mueve de un lado a otro, a sacudidas, abriéndose y cerrándose (recuérdese que la puerta es muy pequeña), y alternativamente rebotando contra su batiente o abriéndose venciendo la fuerza del muelle.

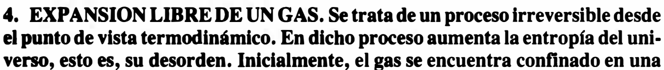
Cuando está abierta, la puerta no funciona obviamente como una válvula unidireccional, ya que las moléculas



3. TRAMPILLA DEMONIACA, una forma del demonio de Maxwell diseñada para funcionar automáticamente y crear desigualdades en la presión, no en la temperatura. Supongamos que una trampilla con un muelle bloquea un agujero que separa dos recintos que contienen inicialmente un gas con la misma temperatura y presión a ambos lados. La puerta se abre en un solo sentido, y así admite moléculas del recinto B hacia el A, pero no al revés. Con el tiempo, cabría pensar, las moléculas se acumularían en A a expensas de B, creando una desigualdad en la presión. La desigualdad no se produce. La trampilla, calentada por las colisiones con las moléculas, se abre y se cierra aleatoriamente debido a su energía térmica. Cuando se abre, no es una válvula unidireccional, y, cuando se cierra, podría empujar alguna molécula de A a B. Este proceso tiene lugar tantas veces como su inverso, en el que una molécula de B empuja la puerta y pasa hasta A.






4. EXPANSION LIBRE DE UN GAS. Se trata de un proceso irreversible desde el punto de vista termodinámico. En dicho proceso aumenta la entropía del universo, esto es, su desorden. Inicialmente, el gas se encuentra confinado en una zona determinada de un sistema (*izquierda*). Se elimina la barrera entre las dos zonas del sistema, y las moléculas transitan desde una zona hacia la otra hasta que en ambas regiones se congrega el mismo número de moléculas (*derecha*).

circulan con libertad en ambas direcciones. Podría esperarse, sin embargo, que la puerta se comportara como un demonio perezoso, atrapando una mínima cantidad de gas en exceso en el recinto de la izquierda, pero ni siquiera esto puede hacer. Cualquier tendencia de la puerta a convertirse en válvula unidireccional, abriéndose para permitir que una molécula de gas vaya de la derecha hacia la izquierda, se compensa con la tendencia contraria, chocando con la molécula que se le anteponga, impulsándola desde el recinto izquierdo hacia el derecho (ayudada por la fuerza del muelle).

Los dos procesos –el de una molécula que fuerza su tránsito de la derecha a la izquierda y el de la puerta que envía una molécula de la izquierda a la derecha– son inversos mecánicos mutuos: la sucesión de imágenes que mostrara uno de estos procesos no podría distinguirse de la que recogiera el proceso contrario. En un entorno a temperatura y presión constantes, los dos procesos se producirían con la misma frecuencia y, por tanto, la trampillla no actuaría como una válvula unidireccional. No puede funcionar, pues, como un demonio.

Naturalmente, estos dispositivos funcionan en medios donde la presión no coincida a ambos lados de la puerta. Versiones a gran escala, construidos con puertas macroscópicas y muelles, pueden verse en los extractores de un restaurante, diseñados para vaciar el aire del interior sin dejar que las ráfagas del aire del exterior penetren, ni siquiera cuando el motor está parado. Las versiones microscópicas funcionarían de la misma forma, permitiendo el paso de las moléculas si hay un exceso de presión en un lado, pero impidiéndoles la circulación si el exceso de presión se produce en el otro lado. Estos dispositivos no violan la segunda ley, ya que dejan sólo que la presión se iguale; en ningún caso forman regiones con una presión en exceso.

Que un demonio elemental no pueda operar, quizá no sea obstáculo para que lo haga otro más inteligente. Lo cierto es que, poco tiempo después de que Maxwell describiera su demonio, muchos investigadores creyeron que la inteligencia constituía la propiedad crítica que permitía el funcionamiento del demonio. Así, en un artículo publicado en 1914 escribía Smoluchowski: "Por lo que conocemos hasta ahora, no existe ninguna máquina automática de movimiento perpetuo que alcance una eficacia permanente, a pesar de las fluctuaciones moleculares; ahora bien, tal dispositivo podría funcionar, quizá de forma regular, si hubiera seres inteligentes que controlaran su comportamiento".

En un artículo publicado en 1929 con el título " Disminución de la entropía en un sistema termodinámico por la intervención de seres inteligentes", el físico Leo Szilard pretendía un análisis cuantitativo del problema. Aunque el título parece implicar que un demonio inteligente podría violar la segunda ley, el artículo se dedica a rechazar esa tesis en pro de la siguiente: ningún ser, inteligente o no, puede violar dicha norma. Szilard pensaba que las observaciones, o las mediciones que debe realizar el demonio (ver de qué lado viene una molécula, por ejemplo) no pueden llevarse a cabo sin un trabajo que cause un incremento de entropía suficiente para salvar el cumplimiento de la segunda ley.

Szilard consideró un demonio que difería en varios aspectos del diablillo de Maxwell. Desde entonces, se le denomina motor de Szilard. (El motor que describiremos aquí divergirá un tanto del original de Szilard.) El principal componente del motor es un cilindro en el que se mueve aleatoriamente una molécula. Cada extremo del cilindro está bloqueado por un pistón; en su interior, hay una pequeña división, móvil, que se coloca en el centro del cilindro, confinando así la molécula en una zona u otra del cilindro [*véase la figura 5*]. El motor consta también de dispositivos que permiten observar en qué mitad del sistema está la molécula y de dispositivos que memorizan esta información.

El ciclo del motor se desarrolla en seis etapas. En la primera, se introduce la división que confina la molécula en una parte o en otra. En opinión de Szilard, el trabajo necesario para esta inserción puede hacerse en principio suficientemente pequeño hasta convertirlo en despreciable.

En la etapa siguiente, el motor determina en qué mitad queda encerrada la molécula. El dispositivo de memoria de la máquina tiene tres estados posibles: un estado blanco, que significa que no se ha realizado ninguna medida; un estado *I*, que significa que la molécula se ha observado en la mitad izquierda del aparato, y un estado *D*, que significa que la molécula se halla en la mitad derecha. Al realizar la medida, la memoria pasa del estado en blanco a uno de los otros dos estados.

La tercera etapa, que podría denominarse la carrera de compresión, de-

pende del conocimiento adquirido en la etapa anterior. El pistón del lado que no contiene la partícula avanza hasta que toca la división. A diferencia de la carrera de compresión que se produce en un motor de combustión interna, ésta carrera no requiere trabajo, pues el pistón "comprime" el vacío; la molécula, atrapada en el otro lado de la partición, no puede oponerse al movimiento del pistón.

En la cuarta etapa, se quita la división, permitiendo las colisiones entre la molécula y el pistón que acaba de adelantarse. Estas colisiones ejercen una presión sobre el pistón.

En la quinta etapa, que podría denominarse carrera de potencia, la presión que ejerce la molécula hace retroceder al pistón hacia su posición inicial, realizando un trabajo sobre él. La energía que la molécula confiere al pistón se remplaza mediante el calor transmitido a través de las paredes del cilindro por el entorno del mismo, con lo que la molécula sigue moviéndose con la misma velocidad promedio. De lo que se infiere que el efecto de la carrera de potencia consiste en la conversión de calor del entorno en trabajo mecánico realizado sobre el pistón.

En la sexta etapa, la máquina borra su memoria, recuperando su estado en blanco. La máquina se halla ahora exactamente en la misma configuración que tenía al comienzo del ciclo, y éste puede repetirse.

Consideradas en conjunto, las seis etapas del ciclo han convertido calor del entorno en trabajo, y la máquina vuelve a su estado inicial. Si durante este ciclo no ocurre ningún otro cambio, la entropía global del universo disminuye. Como en principio se puede repetir el ciclo tantas cuantas veces se quiera, su ejecución conduce a una violación arbitrariamente grande de la segunda ley.

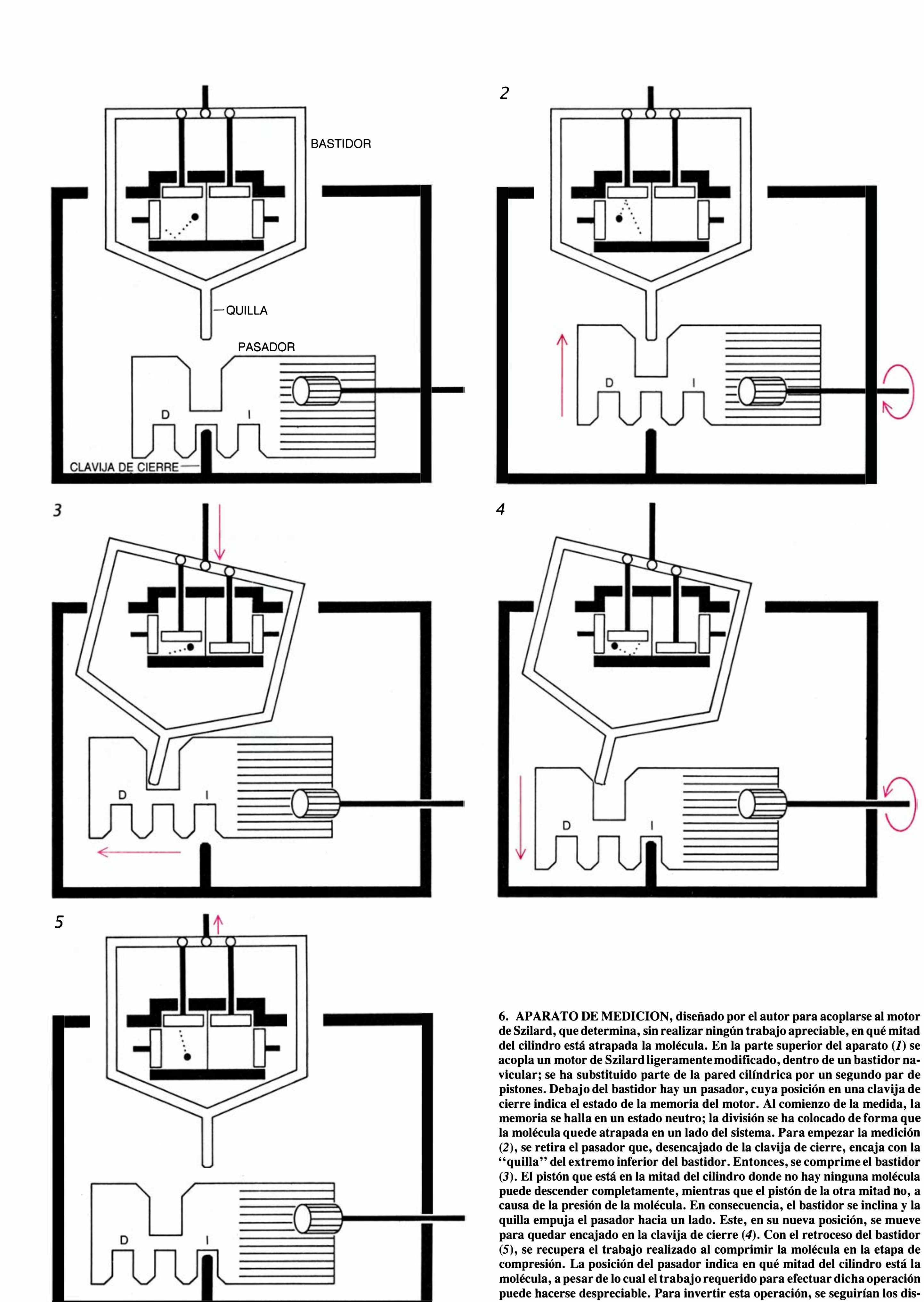
Szilard se salió de este trance postulando que el acto de medir, en el que se determina la posición de la molécula, produce un incremento de entropía suficiente como para compensar la disminución causada en la carrera de potencia. Szilard no precisó la naturaleza y la localización de este incremento de entropía, pero unos años después de la publicación de su artículo, algunos físicos, entre los que distinguimos a Leon Brillouin (quien en 1956 escribió el famoso libro *Science and Information Theory)* y a Denis Gabor (inventor de la holografía), intentaron fundamentar esta irreversibilidad, simplemente postulada, del proceso de medida. En particular, se aprestaron a determinar cuál era el costo, en términos de energía y de entropía, de la observación de una molécula que consistiera en enviarle un haz de luz y en observar sus reflexiones.

En su trabajo, Brillouin y Gabor acudieron a una teoría que había venido desarrollándose desde los tiempos de Maxwell: la teoría cuántica de la radiación. De acuerdo con la teoría ondulatoria clásica (a la que Maxwell hizo importantes aportaciones), la energía de un rayo de luz puede ser arbitrariamente pequeña. Para la teoría cuántica, sin embargo, la luz está formada por paquetes de energía llamados fotones. La energía de un fotón depende de su longitud de onda, de su color, y es imposible detectar menos de un fotón de luz. Brillouin argumentó que, para observar una molécula, ésta ha de difundir como mínimo un fotón de un haz detector; sostuvo, asimismo, que, cuando la energía del fotón se disipe en calor, tal disipación producirá un incremento en la entropía, como mínimo del tamaño de la disminución de la entropía que produce el motor de Szilard, gracias a la información recabada sobre la molécula difusora.

¿Por qué no usar, entonces, un haz de fotones de energía muy pequeña? Esta vía alternativa tampoco resulta viable en razón de otra exigencia, más complicada, de la teoría cuántica. De acuerdo con la teoría cuántica de la radiación, cualquier recinto cuyas paredes y cuyo interior se hallen a tem-

1 MEMORIA DIVISION MOVIL
2
3 D
4 D
5 D
6 D CALOR
7 D CALOR
8

5. MOTOR DE SZILARD, modelado a partir del ingenio descrito en 1929 por el físico Leo Szilard. Por lo que parece, convierte el calor de su entorno en trabajo, saltándose así la segunda ley de la termodinámica. El motor está formado por un cilindro (*1*) que en ambos extremos se halla bloqueado por dos pistones. Está equipado también con una división móvil y con dispositivos que observan el contenido del cilindro y registran los resultados de las observaciones. El cilindro contiene sólo una molécula. Al comenzar el ciclo del motor, se introduce la división (*2*), atrapando la molécula en una zona del cilindro. Mediante el dispositivo de observación, se determina y se registra en qué mitad se aloja la molécula (*3*), y se empuja el pistón de la otra mitad hasta que entra en contacto con la división central (*4*). El movimiento del pistón no requiere trabajo, ya que comprime el espacio vacío. Se retira entonces la división (*5*) y la molécula golpea al pistón, haciéndolo retroceder (*6*). (El gas unimolecular se "expande" contra el pistón.) La energía perdida por la molécula en su forcejeo contra el pistón se recupera luego con calor del entorno. Cuando el pistón se encuentra de nuevo en su posición inicial (*7*), se borra la memoria (*8*) y el ciclo puede comenzar a desarrollarse de nuevo.



6. APARATO DE MEDICION, diseñado por el autor para acoplarse al motor de Szilard, que determina, sin realizar ningún trabajo apreciable, en qué mitad del cilindro está atrapada la molécula. En la parte superior del aparato (*1*) se acopla un motor de Szilard ligeramente modificado, dentro de un bastidor navicular; se ha substituido parte de la pared cilíndrica por un segundo par de pistones. Debajo del bastidor hay un pasador, cuya posición en una clavija de cierre indica el estado de la memoria del motor. Al comienzo de la medida, la memoria se halla en un estado neutro; la división se ha colocado de forma que la molécula quede atrapada en un lado del sistema. Para empezar la medición (*2*), se retira el pasador que, desencajado de la clavija de cierre, encaja con la "quilla" del extremo inferior del bastidor. Entonces, se comprime el bastidor (*3*). El pistón que está en la mitad del cilindro donde no hay ninguna molécula puede descender completamente, mientras que el pistón de la otra mitad no, a causa de la presión de la molécula. En consecuencia, el bastidor se inclina y la quilla empuja el pasador hacia un lado. Este, en su nueva posición, se mueve para quedar encajado en la clavija de cierre (*4*). Con el retroceso del bastidor (*5*), se recupera el trabajo realizado al comprimir la molécula en la etapa de compresión. La posición del pasador indica en qué mitad del cilindro está la molécula, a pesar de lo cual el trabajo requerido para efectuar dicha operación puede hacerse despreciable. Para invertir esta operación, se seguirían los distintos pasos en el orden inverso. (Dibujos esquemáticos de Jerome Kuhl.)

peratura constante está lleno de un "gas" de fotones: un baño de radiación. Las longitudes de onda de los fotones dependen de la temperatura del recinto. Este gas de fotones constituye el resplandor rojizo o naranja del interior de un horno caliente. (A temperatura ambiente, la mayor parte de los fotones están en la zona infrarroja del espectro y por consiguiente son invisibles.)

El gas de fotones podría parecer, a primera vista, una cómoda fuente de luz mediante la cual el demonio observaría las moléculas de gas (ahorrándose el coste de entropía de su luz). Sin embargo, una de las consecuencias sorprendentes de la segunda ley (descubierta por Gustav Robert Kirchhoff en 1859) es que, con la luz propia de un recinto a temperatura uniforme, resulta imposible ver nada. Si uno mira el interior de un horno donde se cuecen objetos de barro, por ejemplo, se ve un resplandor de color naranja uniforme, desprovisto de contraste, aun cuando los objetos del interior tengan color, brillo o textura superficial diferentes.

Diríase que los objetos del interior del horno presentan el mismo color y brillo, lo que no es cierto y se comprueba fácilmente iluminándolos desde fuera del horno con una luz brillante. La razón por la que los cuerpos desaparecen a la luz del horno es que los oscuros (es decir, los no reflectantes) aparecen proporcionalmente más brillantes que los objetos claros (reflectantes), de suerte que la intensidad de la luz total que proviene de cada objeto (reflejada y emitida) es la misma.

Para entender por qué semejante y extraña igualación de la intensidad tiene lugar, imaginemos que no ocurriera y pensemos acerca de sus consecuencias para la segunda ley. Supongamos que un jarrón y una taza se encierran en un horno a temperatura uniforme. Si la intensidad de luz que desde el jarrón se dirige hacia la taza fuera mayor que la que va desde la taza hacia el jarrón, se produciría un flujo de energía desde ésta hacia aquél. El jarrón se calentaría y la taza se enfriaría.

Así, sin consumo de trabajo, dos regiones que inicialmente estaban a la misma temperatura alcanzarían temperaturas distintas, igual que si el demonio de Maxwell se hubiera sentado entre ellos: habríase violado la segunda ley. Por consiguiente, si la segunda ley es válida, los objetos introducidos en un recinto con temperatura uniforme no pueden tener diferentes intensidades de luz superficiales.

Para distinguir los objetos encerrados en el interior de un horno hay que iluminarlos, pues, con una fuente externa, una lámpara de destellos, por ejemplo, cuyo filamento alcanzara una temperatura mayor que la temperatura del horno. En la vida diaria, una fuente luminosa de estas características –el sol– es la que posibilita ver los objetos en recintos que están uniformemente a temperatura ambiente.

Brillouin, Gabor y otros, armados con sus conocimientos del gas de fotones, sostuvieron que el demonio de Maxwell no podía observar las moléculas para ordenarlas sin utilizar algún tipo de fuente luminosa. Lo que es lo mismo, negaban que el demonio violara la segunda ley. Cada vez que observa una molécula del gas, el diablillo debe disipar, como mínimo, la energía de un fotón, energía del fotón que debe ser mayor que cierta energía mínima (la determinada por la temperatura del gas en la que está el demonio). Estos razonamientos, aunque no del todo rigurosos, parecen confirmar la idea de Szilard según la cual la adquisición de cierta cantidad de información comporta la producción de una cantidad correspondiente de entropía.

La contribución que asestó un golpe mayor a la hipótesis del diablillo débese a los trabajos realizados en termodinámica del proceso de datos por Rolf Landauer, investigador de IBM. Ciertas operaciones de proceso de datos, verbigracia, la copia de la información de un dispositivo en otro, no divergen mucho de las operaciones de medida, en las que un dispositivo adquiere información sobre el estado de otro. En ese sentido, creíase, por los años 50, que las operaciones de proceso de datos eran intrínsecamente irreversibles (en la significación termodinámica del vocablo), de la misma manera que Szilard había argumentado que una medida era, en general, irreversible. Se opinaba que todo tipo de operación con información requería, en el peor de los casos, la generación y el traslado de un bit de calor por cada bit de datos procesado. (Cantidad de calor extremadamente pequeña; una diezbillonésima del calor generado por los circuitos electrónicos existentes.)

A comienzos de la década siguiente, Landauer analizó la cuestión con mayor detenimiento. Descubrió que había operaciones costosas desde el punto de vista termodinámico, y otras, entre las que se incluían (bajo condiciones apropiadas) el copiar información de un dispositivo en otro, que se hallaban exentas de cualquier limitación termodinámica [véase "Los límites físicos fundamentales de la computación", por Charles H. Bennett y Rof Landauer; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA septiembre de 1985].

La demostración de Landauer arrancaba de una premisa: los distintos estados lógicos de un ordenador podían representarse por distintos estados físicos del soporte físico del mismo. En concreto, cada estado posible de la memoria de un ordenador podía representarse por una configuración física diferente (es decir, un distinto conjunto de corrientes, voltajes, campos, etcétera).

Supongamos que se inicializa un registro de memoria de n bits; en otras palabras, supongamos que el valor de cada uno de ellos se fija en cero, sin importarnos cuál era su valor previo. Antes de esta operación, el registro podía estar en cualquiera de los 2^n estados admisibles. Después de esta operación, el registro se halla sólo en un estado. La operación, por tanto, ha comprimido muchos estados lógicos en uno solo, de la misma forma que el pistón comprime un gas.

De acuerdo con la premisa de Landauer, para comprimir un estado lógico en un ordenador se debe comprimir también su estado físico: se debe disminuir la entropía de su soporte físico. De acuerdo con la segunda ley, la disminución de la entropía del soporte físico del ordenador no puede ocurrir sin un incremento de entropía del entorno del ordenador. Por consiguiente, no se puede inicializar un registro de memoria sin generar calor y sin aumentar la entropía del entorno. Así, inicializar una memoria es una operación termodinámicamente irreversible.

Landauer identificó otras operaciones que eran termodinámicamente irreversibles. Todas esas operaciones compartían un mismo abandono de información relativa al estado anterior del ordenador. Se trataba de operaciones "lógicamente irreversibles", por emplear la terminología utilizada por Landauer.

La conexión de estas ideas con el problema de la medición, implícito en el trabajo de Landauer y en los modelos reversibles de computación desarrollado durante los años 70 por Edward Fredkin del MIT, por el autor de este trabajo y por otros investigadores, concluyó en 1982, cuando propuse la correcta explicación del demonio de Maxwell. Consideremos el ciclo del

motor de Szilard. La última etapa, durante la cual la memoria de la máquina se pone en un estado blanco, es lógicamente irreversible, ya que comprime dos estados de la memoria del motor ("La molécula está en la izquierda" y "La molécula está en la derecha") en uno solo ("No se ha definido todavía la posición de la molécula"). Ocurre así que el motor no puede reinicializar su memoria sin añadir como mínimo un bit de entropía al entorno. Esto convierte todo el trabajo que se había ganado en la carrera de potencia de nuevo en calor.

¿Qué sucede en la etapa en que se mide la posición de la molécula? ¿También es costosa desde el punto de vista termodinámico? En este caso, la máquina incrementaría la entropía del universo por partida doble: en correspondencia con la medida de la posición de la molécula y, luego, con la reinicialización de su memoria después de la carrera de potencia. Pero lo cierto es que la medición no tiene por qué ser costosa desde el punto de vista termodinámico. Hay otras formas de observar las moléculas que no se basan en exponerlas a ningún tipo de destello. Para demostrar este punto he diseñado un dispositivo de medida, reversible, que mide y registra la posición de la molécula sin llevar a cabo ningún proceso que sea termodinámicamente irreversible.

Hemos encontrado, pues, por qué razón el demonio no puede violar la segunda ley: para observar una molécula, ha de olvidar antes los resultados de las observaciones que le precedieron. Olvidar resultados o desechar información resulta costoso desde el punto de vista de la termodinámica.

Con todo, si el demonio tuviera una memoria muy potente, recordaría los resultados de todas sus medidas. Ninguna etapa sería lógicamente irreversible y el motor convertiría un bit de calor en un bit de trabajo en cada ciclo. La cuestión radicaría entonces en el ciclo; éste no sería tal, pues la memoria del motor, que se hallaba en blanco, adquiriría otro bit aleatoriamente. La interpretación termodinámica correcta de esta situación consistiría en decir que el motor incrementa la entropía de su memoria para rebajar la entropía del entorno.

La atribución del incremento de entropía a la etapa de reinicialización, y no a la etapa de medida, podría parecer un mero recurso académico, ya que el ciclo completo de un motor de Szilard debe contener ambas etapas; ahora bien, nos ahorraremos bastante confusión si distinguimos con claridad entre adquisición de nueva información y destrucción de información antigua. La confusión podría haber o no existido en la mente de Szilard. En la mayoría de sus artículos alude a la medición como si se tratara de una etapa irreversible; pero hay un momento en que hace un recuento de los cambios entrópicos registrados durante el ciclo y encuentra, sin comentarlo de forma explícita, que el incremento de entropía se produce durante la reinicialización de su memoria.

Si se hubiera profundizado en este aspecto de los trabajos de Szilard, se hubiera llegado al conocimiento que tenemos ahora del demonio de Maxwell. Omisión que, ironía de las cosas, no es infrecuente en historia de la ciencia: el crecimiento de una rama (la teoría cuántica de la radiación) retrasa aparentemente el desarrollo de otra rama (la termodinámica). Un principio de la mecánica cuántica que refuerza la idea según la cual, para adquirir información, se debe pagar un precio termodinámico fundamental, es el de incertidumbre, en virtud del cual ciertos grupos de mediciones no pueden realizarse con más de un cierto grado de precisión. Aunque el principio de incertidumbre parece similar a otra hipótesis de Szilard (las medidas comportan un coste entrópico irreducible), la verdad es que difieren desde sus cimientos. La hipótesis de Szilard se ocupa del coste termodinámico de las mediciones, el principio de incertidumbre, de la posibilidad de que se puedan llevar a cabo, cualquiera que sea su coste termodinámico.

Otra fuente de confusión es que en general no se piensa en la información como una restricción. Pagamos para adquirir los periódicos, no para tirarlos. Intuitivamente, el recuerdo de las acciones pasadas del demonio parece ser un ingenio valioso (o en el peor de los casos útil). Mas, para el demonio, "el periódico de ayer" (resultado de una medición previa) ocupa un espacio importante, y el costo de limpiarlo neutraliza el beneficio obtenido del periódico cuando éste era fresco. Quizá la creciente conciencia de contaminación ambiental y explosión de la información obtenida gracias a los ordenadores ha hecho que la idea de que la información pueda convertirse en un valor negativo nos parezca ahora más natural que años atrás.

Los comienzos de la agricultura en el noroeste de Europa

Hace 8000 años, la agricultura se extendió desde el este de Europa hacia el norte y el oeste. Los mapas de distribución de yacimientos de la edad de Piedra están revelando cómo se produjo esa "invasión"

John M. Howell

¿Cómo llegó la agricultura al norte de Europa? Desde hace algún tiempo se conocen las líneas generales de ese acontecimiento. Poco después del 6000 a. de C., los portadores de la Cultura de la Cerámica de Bandas empezaron a moverse desde la Europa del este hacia el norte y el oeste, llevando consigo un modo de vida basado en el cultivo de la tierra. Pero el cuadro pormenorizado de esa "invasión" ha cambiado radicalmente en los años últimos. En la década de 1970 admitíase todavía que la Cultura de la Cerámica de Bandas se había difundido de modo relativamente uniforme, remontando las cuencas de los principales ríos en fajas lineales. Hoy sabemos que el mecanismo no fue ni lineal ni uniforme. Por el contrario, las estaciones de la Cerámica de Bandas se agrupaban en "células de poblamiento", es decir, densas aglomeraciones de aldeas que formaban las unidades básicas de poblamiento. Algunas de esas células perduraron hasta poco antes de la era cristiana.

Uno de los principales instrumentos utilizados en la revisión ha sido el mapa de distribución. Considerados antaño como poco más que un medio de localizar estaciones, se les reconoce ahora una gran riqueza de posibilidades. Los mapas en cuestión no sólo han servido para demostrar la existencia de células de poblamiento, sino también para revelar cambios sorprendentes en épocas posteriores del Neolítico (el período asociado con la introducción de la agricultura). En el Neolítico inicial —la fase de la Cerámica de Bandas— los yacimientos tendían a encontrarse en el fondo de los valles fluviales. A partir de allí subían al borde de la meseta situada sobre el valle, y después a la meseta misma. Esos cambios se acompañaban de transformaciones técnicas y sociales importantes, que se están perfilando por vez primera merced al empleo del, un tiempo humilde, mapa de distribución.

La Cultura de la Cerámica de Bandas recibe este nombre de la decoración incisa e impresa que aparece en sus enseres cerámicos. Aunque presenta algunas variaciones, el rasgo más llamativo de los yacimientos de la Cerámica de Bandas es su uniformidad cultural, uniformidad que se hace sentir tanto en sus enseres como en los yacimientos mismos. Las estaciones de la Cerámica de Bandas se componen de caseríos o de pequeñas aldeas, rodeadas en ocasiones de una empalizada. Cada aldea está formada por casas alargadas, de armadura de madera, y con unas dimensiones aproximadas de 30 metros de largo por cinco de ancho. Muchas tenían tres subdivisiones, destinadas quizás a personas, grano y ganado, respectivamente. La existencia, en algunos yacimientos, de una casa más larga que las otras (aunque construida de la misma forma), podría interpretarse como indicio de una incipiente diferenciación social.

La uniformidad de las aldeas de la Cerámica de Bandas es síntoma de que la agricultura fue introducida en Europa por inmigrantes, y no simplemente por la expansión de nuevas ideas. La cultura material común asociada con las aldeas comprende un bagaje de instrumentos de sílex, hachas pequeñas y enterramientos no monumentales. Estos rara vez forman cementerios: a menudo se encuentran en fosas que flanquean las casas alargadas y de las que se extraía el barro con que revocar las paredes. Los restos de animales y de plantas indican un modo de vida agrícola; la oveja y el vacuno constituían los principales animales domésticos. En las zonas donde se conservan bien los restos orgánicos, se encuentra con frecuencia una mezcla de cereales, verduras y legumbres (por ejemplo, la lenteja).

Desde el 5500 a. de C., aproximadamente, los grupos de la Cerámica de Bandas empezaron a desplazarse hacia el norte y el oeste desde sus estaciones de partida en las montañas de los Cárpatos, alcanzando hacia 4500 a. de C. la comarca de París. La interpretación original, carente de rigor, pretendía que los yacimientos formaban un arco lineal en torno al Danubio, por lo que inicialmente se les dio el nombre de Cultura del Danubio. Se observó que en la elección del emplazamiento de sus poblados aquellos primitivos agricultores se inclinaban por los suelos



1. TUMBA DEL NEOLITICO TARDIO que se halla en Saumur, en el valle del Loira, lugar de enterramiento colectivo que pudo albergar 200 o más se-

glaciales y livianos denominados loess. Conforme a los patrones del desarrollo de la agricultura incipiente, se consideraba que los campesinos practicaban la roza o el desmonte por el fuego, forma de agricultura en la que los campos se cultivan durante una temporada, o hasta que están exhaustos o cubiertos de hierbajos, y entonces se abandonaban (la roza o desmonte se practica a menudo por procedimientos de tala y quema).

La investigación reciente ha demostrado que gran parte de esa reconstrucción es errada. La revisión comenzó a principios de la década de 1970, sobre todo merced a la labor de Janusz Kruk, del Instituto de Ciencias de Cracovia, que estudió los esquemas del poblamiento del Neolítico inicial en las cercanías de aquella ciudad. El sistema de Kruk se basa en la integración de información económica, social y ecológica en mapas de distribución, y se ha convertido en la piedra angular de las interpretaciones posteriores. Muchas de éstas (las mías incluidas) han partido de la Universidad de Oxford y han consistido en ampliar el enfoque geográfico, extendiéndolo a zonas mal estudiadas de otras partes de Europa. En mi caso, la zona de interés se situaba en Francia, donde me concentré en la región bañada por tres grandes ríos, el Sena, el Oise y el Marne.

No se crea por ello que toda la nueva investigación partiese de Oxford. En rigor, el concepto fundamental de la célula de poblamiento no lo formularon investigadores ingleses, sino alemanes, entre otros Bernhard Sielmann, entonces en el Museo de Frankfurt. Una razón de que la idea se avanzara en Alemania estriba en el hecho de que las estaciones próximas al Rhin se concentran densamente en los fondos del valle, lo que debió favorecer el concepto de célula, o unidad, frente al de esquema lineal. Siguiendo a Sielmann, los arqueólogos localizaron agrupaciones semejantes en el Limburg holandés (a lo largo del curso del Maas y de sus afluentes) y en la llanura de Aldenhoven, cerca de Colonia.

Entre el Limburg y el Loira, donde llevé a cabo mi trabajo, el panorama no es tan claro. En esta región, el loess glacial, preferido por los agricultores de la Cerámica de Bandas, no se encuentra en grandes extensiones del ancho fondo del valle. Antes bien, las paredes de valles profundos descienden abruptamente en escalones de hasta 30 metros desde los promontorios superiores. Los valles son demasiado estrechos para que se formen grandes aglomeraciones de aldeas; en consecuencia, las células de poblamiento no saltan a la vista de un modo inmediato. El examen cuidadoso que realicé a través de excavaciones, prospecciones, colecciones de museos y fotografías aéreas, reveló la existencia de zonas de poblamiento denso, en contraste con la ausencia de estaciones en otras zonas. Las pequeñas células de poblamiento pueden ocupar sólo uno o dos sectores de un valle fluvial estrecho, pero son análogas a las unidades, más evidentes, que se encuentran en Alemania y en Holanda.

Tanto si las estaciones se agrupan en apretadas células de poblamiento como si lo hacen según el dispositivo más lineal de Francia, se encuentran siempre en el fondo del valle. En éste, los meandros del río dibujan "islas" de suelo aluvial rico, y en estas islas los agricultores levantaban sus aldeas. Las islas se hallan sobre el nivel de las crecidas normales, pero lo bastante bajas para quedar inundadas periódicamente. El área de esas parcelas aluviales oscila entre 125 y más de 500 hectáreas. Su tamaño permite calcular la población que podrían sostener. La extensión de tierra necesaria para alimentar a una persona con trigo prehistórico varían, según las estimaciones, desde media hectárea hasta una hectárea. Por consiguiente, las islas mayores pudieron alimentar a unos quinientos habitantes, o incluso más.

Se ha reconstruido la ecología de las islas aluviales analizando muestras de los suelos de fosas y hoyos de postes de las aldeas de la Cerámica de Bandas. El resultado de esta labor revela que los fondos de valle estaban cubiertos de un suelo rico, oscuro, parecido a la "tierra

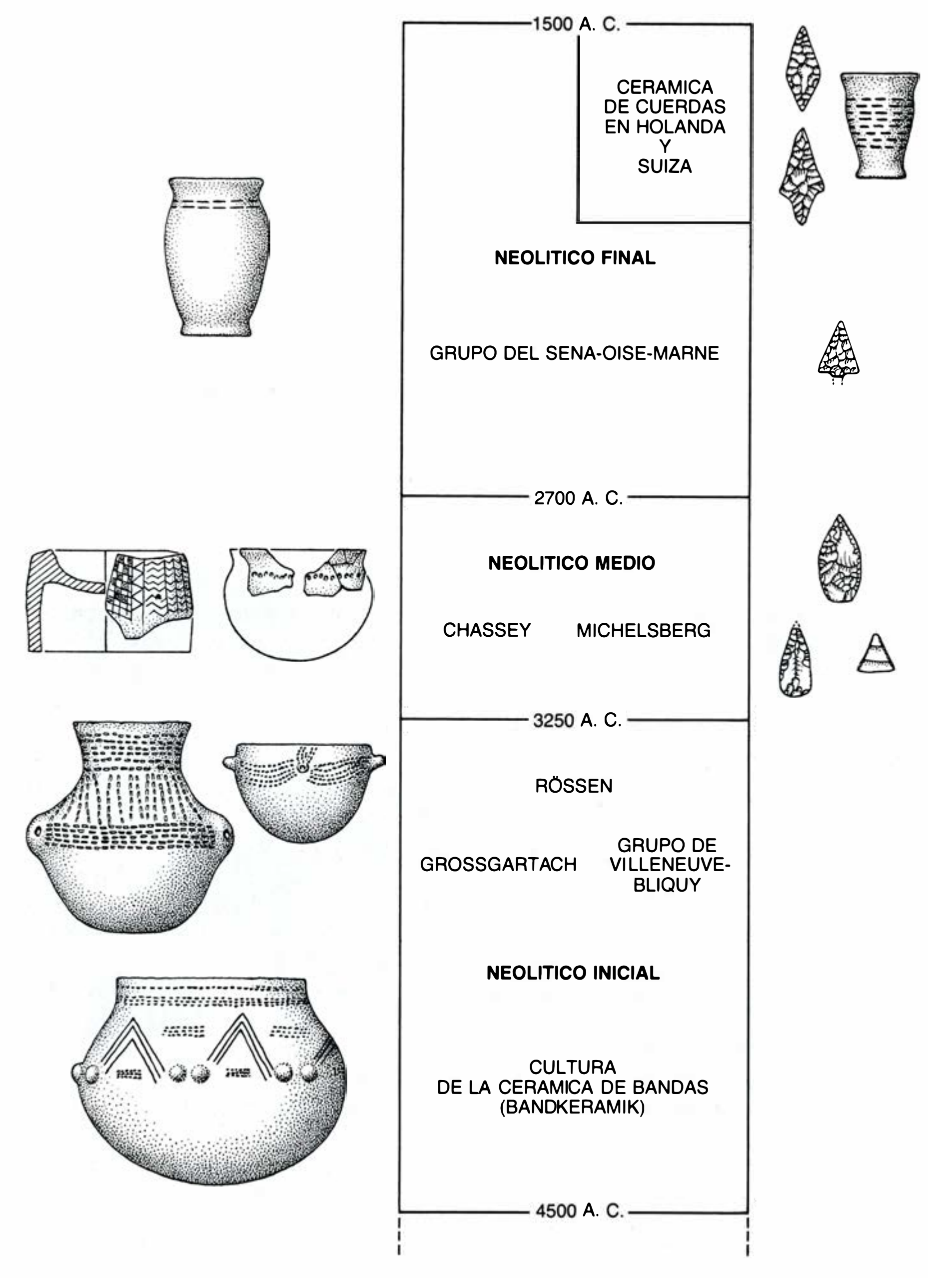


pulturas. Pertenece al tipo *allée couverte* (corredor cubierto). Las paredes se elevan hasta unos 1,5 metros de altura. Las piedras probablemente estaban cubiertas por un túmulo de tierra. Los estudios del autor indican que, durante el Neolítico final, en algunas zonas de Francia las tumbas colectivas constituían el centro geográfico de casas unifamiliares diseminadas. El hallazgo forma parte de una reciente revisión de los esquemas espaciales de la cultura neolítica.

negra" de la Europa del Este. En la época de su ocupación, este suelo sostenía abundantes prados, en los cuales los aldeanos de la Cerámica de Bandas no practicaban la adquisición de campos por el procedimiento de tala y quema, como había imaginado la investigación anterior. Por el contrario, y como ha demostrado la labor de mediados de los años 70, practicaban una forma de horticultura en la que las parcelas se cultivaban durante muchos años. El sistema de la parcela fija proporcionó una considerable estabilidad: se ha comprobado que algunas aldeas estuvieron habitadas durante 500 años o más.

La cultura paneuropea basada en este sencillo sistema agrícola perduró hasta el 4000 a. de C., aproximadamente. Poco después de esa fecha, factores ecológicos y sociales comenzaron a transformar de un modo radical el panorama cultural. La transformación se debió en parte al hecho de que dentro de los dominios de la Cerámica de Bandas habían empezado a formarse subregiones con sus propios caracteres culturales distintivos. Por ejemplo, la cerámica conocida como vajilla del Limburg se encuentra desde el Limburg holandés hasta la Picardía francesa, atravesando el arco de tierras bajas que se extienden al oeste del Rhin. Toda esa zona de tierras bajas habría que considerarla, probablemente, un fenómeno de unidad de poblamiento, que se mantuvo el suficiente tiempo para dar lugar a un estilo cultural. Lo mismo ocurrió sin duda en otros sitios, de modo que, conforme declinaba el Neolítico inicial, su uniformidad cultural iba dejando paso a estilos distintos.

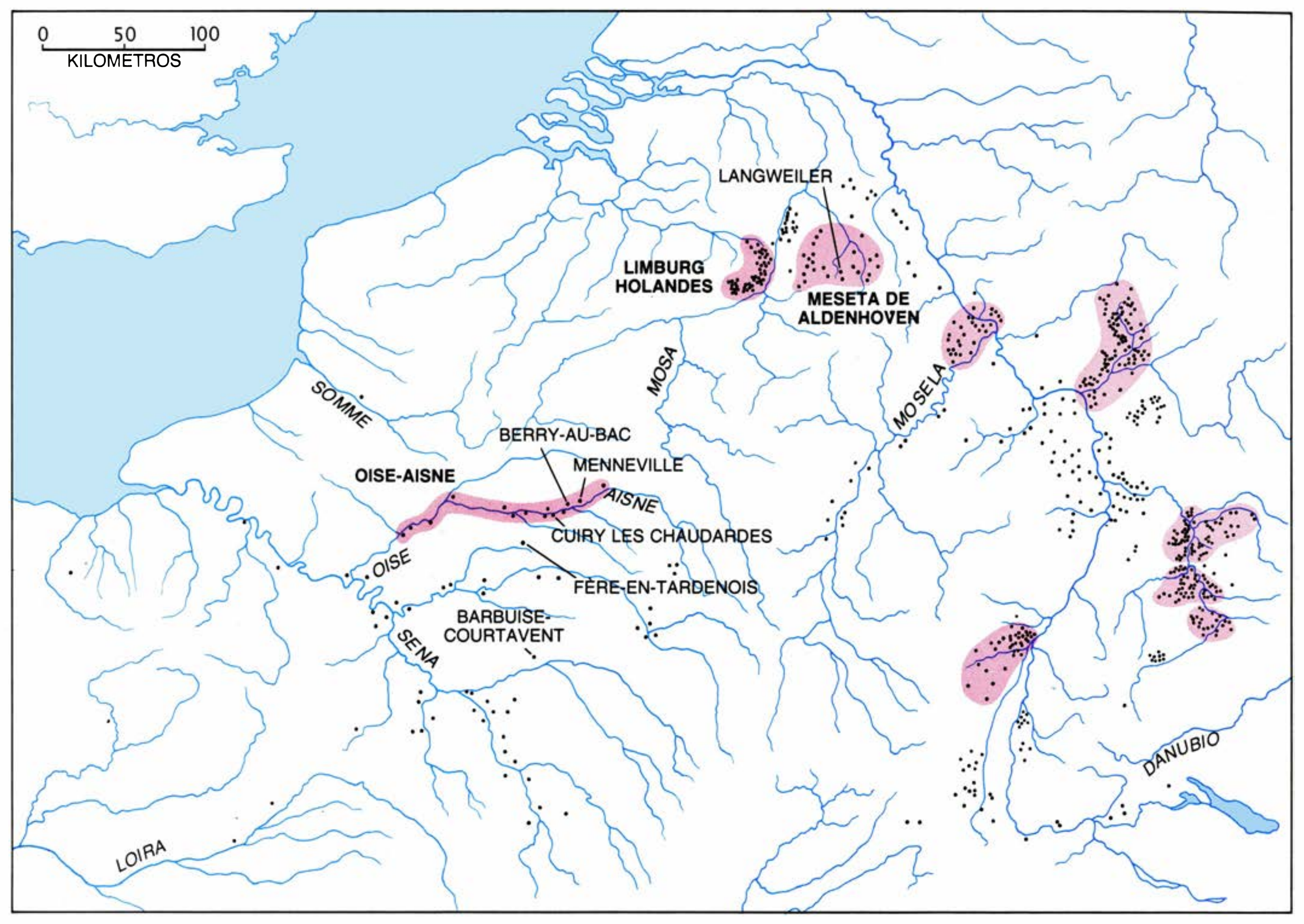
A comienzos del Neolítico medio, hacia 3500 a. de C., se producen cambios más profundos aún, según revelan los cambio de tipo, emplazamiento y distribución de los poblados. A diferencia de las aldeas de la Cerámica de Bandas, las estaciones del Neolítico medio se pueden encontrar fuera del nicho ecológico del fondo del valle. A la par del cambio de emplazamiento se produce un notable aumento de poblados defendidos por fosos y sólidas empalizadas de troncos de árbol. Aparentemente, la sociedad había entrado en una fase belicista. También se había hecho más dependiente del ganado, que en el Neolítico medio superaba el 50 por ciento de los restos de animales, mucho más que en el período anterior.



2. EN EUROPA, EL PERIODO NEOLITICO, asociado con el comienzo de la agricultura, abarcó más de 3000 años. Los introductores de la agricultura en el noroeste de Europa pertenecían a la Cultura de la Cerámica de Bandas. En tiempos del Neolítico inicial, esa cultura inundó el viejo continente. En el Neolítico medio, la uniformidad cultural cedió el paso a estilos regionales, tales como los de Grossgartach, Chassey y Michelsberg. Proliferaron las puntas de flecha de sílex, porque la sociedad se había hecho belicista.

¿Cómo interpretar estos cambios? Habría que señalar, primero, que algunas de sus raíces ya estaban presentes a finales de la cultura de la Cerámica de Bandas. Las excavaciones del yacimiento denominado Langweiler 3, en la meseta de Aldenhoven, y las de Minneville, en el valle del Aisne, han descubierto poderosas fortificaciones rodeadas de fosos. El parecido de sus métodos de construcción indica que los dos recintos son contemporáneos, y los enseres cerámicos encontrados con ellos pertenecen a un estilo tardío de la Cerámica de Bandas, denominado de Grossgartach. Recintos semejantes se han encontrado en el valle del Sena, en Barbuise-Courtavent, y en el valle del Aisne, en Berry-au-Bac. Sin embargo, la mayoría de los recintos rodeados de foso se fechan entre 3500 y 2700 a. de C., en el Neolítico medio. Se diría, por tanto, que las fuerzas presentes a finales del Neolítico inicial experimentaron una aceleración que acabaría por dar lugar a comunidades que parecen muy distintas de las más antiguas.

En el empeño por interpretar la naturaleza de esas fuerzas, los prehistoriadores del noroeste de Europa recurrieron en primer lugar al concepto de las influencias culturales. La cerámica asociada a los recintos fortificados del Neolítico medio de Francia y Alemania pertenece, en líneas generales, a dos tipos, que se conocen como Chassey y Michelsberg. La cultura de Chassey se extiende por Francia central y meridional, y la de Michelsberg por el centro



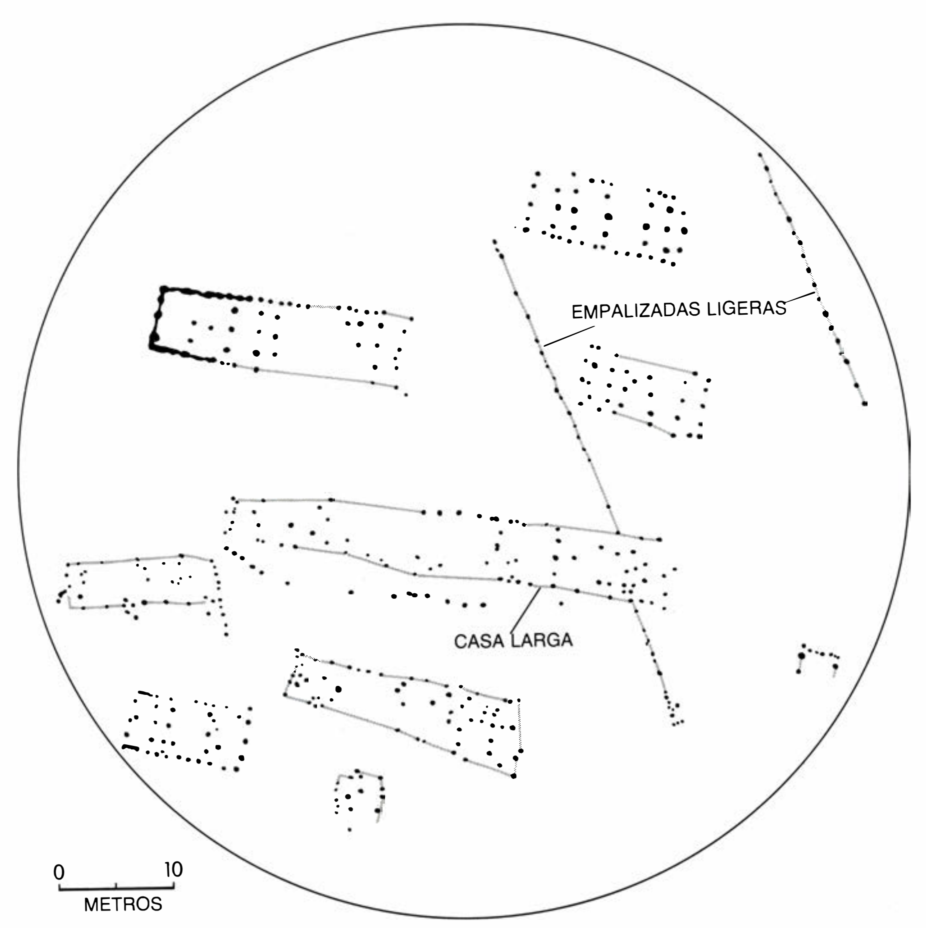
3. ESTACIONES DE LA CERAMICA DE BANDAS, que se agrupan en "células de poblamiento" cuya existencia fue advertida en la década de 1970. Desde el este de Europa y a lo largo de los principales ríos, los grupos de la Cerámica de Bandas se desplazaron hacia el norte y el oeste. Se creyó un tiempo que las estaciones se distribuían al azar por los valles de los ríos. El panorama cambió al imponerse el concepto de las células de poblamiento. Representadas aquí en rojo, se trata de grupos de estaciones, vinculadas unas con otras e implantadas aproximadamente al mismo tiempo. En la meseta de Aldenhoven, cerca de Colonia, y en el Limburg holandés, las células constituyen densas aglomeraciones. En los cursos de los ríos Oise y Aisne, Francia, las células son más lineales.

de Alemania. Los investigadores se han esforzado por comprender las relaciones entre ambas, basándose en el supuesto de que la cultura de Chassey tenía afinidades con el ámbito mediterráneo y, la de Michelsberg, con Europa central. Se creía que, una vez comprendidas las influencias de las unas sobre las otras, resultaría más fácil encontrar la clave del cambio social que se produce en el Neolítico medio.

Sin embargo, gran parte de los argumentos utilizados estaban fuera de lugar, entre otras cosas por carecer de una base geográfica firme. En el terreno montañoso de Suiza, grupos análogos, "centroeuropeos" y "mediterráneos", ocupaban diferentes valles. En el suelo llano y abierto de la cuenca de París, no estaban tan claras, en cambio, las fronteras culturales. Era indudable que hubo una relación asidua entre grupos de culturas ligeramente distintas. De hecho, la interacción era tan intensa que los estilos se entremezclaban; al norte del Loira, la principal diferencia entre ellos estriba en que la llamada cerámica de Chassey está decorada, mientras que la de Michelsberg es lisa. En otras palabras, al norte del Loira, la tradición es firmemente centroeuropea, pero con ciertas influencias exteriores.

Una labor más fructífera se ha centrado recientemente en los aspectos del desarrollo social que son comunes tanto a la tradición de Chassey como a la de Michelsberg. Al hacerlo así se ha puesto particular empeño en el examen de los esquemas espaciales, sobre todo en la expansión dirigida desde el fondo de los valles hacia nuevas zonas del paisaje. En el valle del Somme se advierte con claridad que los utensilios de la Cerámica de Bandas de época tardía (por ejemplo, las hachas de piedra) empiezan a encontrarse fuera de las islas aluviales. Un examen más atento de los valles del Aisne y del Oise revela que de ningún modo se abandonaron las islas aluviales; aún se encuentran recintos en el fondo de los valles. Sin embargo, un grupo nuevo de esos recintos aparece en territorio no ocupado con anterioridad en el borde de la meseta, particularmente en promontorios de fácil defensa. La mayoría de esos nuevos yacimientos dominan, desde arriba, los emplazamientos de las aldeas del Neolítico inicial situadas en el fondo del valle.

Junto con los cambios de posición se produjo un desplazamiento en el esquema de distribución. Las estaciones del Neolítico inicial parecen salpicadas más o menos al azar por las islas aluviales. Por el contrario, las del Neolítico medio tienden a agruparse en conglomerados mayores. La forma de la agrupación varía según la localidad. En el valle del Sena, por ejemplo, los recintos se emparejan a menudo en sendos promontorios, mirándose uno a otro a través del valle. ¿Eran enemigos o aliados? (Dadas las vaguedades de los registros arqueológicos, también es posible que no fuesen estrictamente contemporáneos.) En el valle del Aisne, las estaciones de la Cerámica de Bandas se habían distribuido al azar, en términos estadísticos, por la terraza inferior, cerca del río. Los yacimientos del Neolítico medio se encuentran en



4. POBLADO DE CERAMICA DE BANDAS cerca de la aldea de Cuiry les Chaudardes, en el valle del Aisne, excavado a comienzos de la década de 1970 por investigadores de la Universidad de París. Los principales edificios del poblado eran casas largas: estructuras de madera, rellenas de barro y techadas de junco, hierba y matorrales. La presencia de una casa mayor que las otras (*centro*) quizás indique que el poblado tenía un jefe. Entre las casas había empalizadas ligeras, hechas de arbolillos, probablemente para encerrar animales. La excavación, circular, que rodea las casas quizás abarque sólo una cuarta parte de la aldea.

ese lugar en agrupaciones estadísticamente no aleatorias; dentro de los grupos, las estaciones distan unos dos kilómetros entre sí.

Aunque los desplazamientos espaciales estuvieron acompañados de algunos cambios económicos, en general la base de la economía no se modificó. Las nuevas estaciones, situadas al borde de la meseta ribereña, están emplazadas para sacar provecho de la fuente de los muchos arroyos que parten de la línea de manantiales. Este esquema revela que las comunidades del Neolítico medio, como sus antepasadas del Neolítico inicial, carecían de arados pesados (probablemente los tuvieran ligeros), y también de sistemas de regadío, por lo que dependían del agua del suelo para sus cultivos. La novedad parece ser aquí la mayor dependencia respecto del ganado, que requiere zonas de pastos bastante extensas. La búsqueda de pastos pudo haber sido uno de los factores que motivaron el movimiento ascendente, lejos del fondo de los valles.

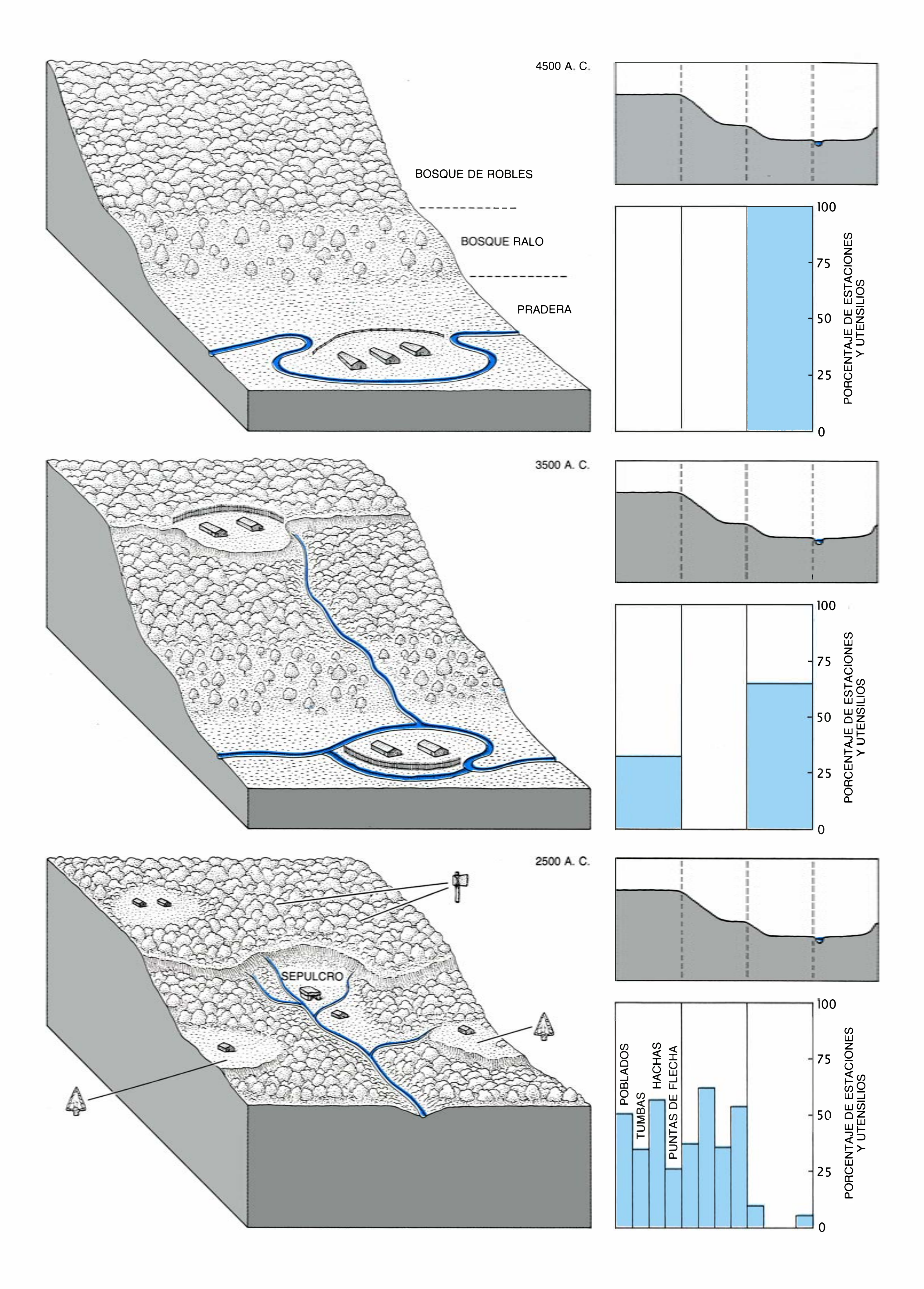
La búsqueda de tierras de pastos pudo, a su vez, fomentar un afán exploratorio que llevase al contacto entre grupos situados a gran distancia. Es evidente que el Neolítico medio constituyó una época de creciente intercambio a grandes distancias. Además de la búsqueda de pastos, el afán exploratorio pudo haber instado una necesidad de recursos que escaseaban, tales como sílex con que fabricar utensilios, o rocas volcánicas para obtener hachas. En la Inglaterra de la época esas piedras eran objeto de trueque a distancias de 600 kilómetros o más. En Francia no se ha estudiado el comercio de sílex y de piedra; sin embargo, el Oise conoció, a buen seguro, una activa minería de sílex, que pudo dar pie a intercambios a grandes distancias. El Oise constituye un área donde los recintos fortificados del Neolítico medio aparecen muy concentrados; esos recintos quizá desempeñaron un papel fundamental en la redistribución de materias primas y de objetos de prestigio (tales como cerámica muy decorada en particular) por medio del comercio.

¿Puede establecerse un modelo que explique algunos de los llamativos cambios que se observan en el Neolítoco medio? Sí. El estímulo subyacente para el cambio pudo haber sido la conjunción de un empeoramiento climático y de la necesidad de recursos naturales. En las postrimerías del Neolítico inicial, gran parte del mejor suelo aluvial había sido ocupada por inmigrantes de la Cerámica de Bandas. En la práctica, la frontera estaba cerrada, y la expansión ya no proporcionaba una salida fácil al exceso de población. Al mismo tiempo, se carecía de la tecnología necesaria para la explotación de suelo virgen en la meseta (verbigracia, el arado pesado). En tales condiciones, el empeoramiento del clima pudo romper las hostilidades, que traerían como consecuencia la concentración de las estaciones en posiciones defensivas y la construcción de fortificaciones.

Varios tipos de pruebas indican que este criterio se ajusta por lo menos a una parte de la realidad. La confirmación de una sociedad más belicista la dan no sólo las voluminosas fortificaciones, sino también la diversidad de los tipos de puntas de flecha que abundan en el Neolítico medio. Es más: en algunas estaciones, como Crickley Hill, de los Cotswolds ingleses, las puntas de flecha encontradas entre los escombros de una empalizada quemada constituyen una prueba irrefutable de hostilidades.

La demostración de que hubo un empeoramiento del clima reviste una importancia crucial para acreditar la validez del criterio apuntado. Los datos de que disponemos indican que en el Neolítico medio el clima se hizo más frío y más lluvioso, lo que muy probablemente hizo descender la producción agrícola. Los diagramas de polen (cálculos efectuados a partir de los granos de polen obtenidos de muestras de suelos de la época, que revelan la distribución de las especies de plantas) de la región del Aisne señalan un aumento de las plantas acuáticas desde la última época de la Cerámica de Bandas. Y en el Neolítico final, gran parte de la región aluvial del Aisne parece haberse

5. DISTRIBUCION ESPACIAL DE LAS ESTACIONES, que experimentó cambios radicales durante la edad de Piedra. A comienzos del Neolítico (*arriba*), las aldeas de la Cerámica de Bandas se encontraban en "islas" ricas de suelo aluvial, talladas por los meandros de los ríos. En el Neolítico medio (*centro*) algunas estaciones habían subido a promontorios situados encima del valle; muchas de esas estaciones aparecen firmemente fortificadas. En el Neolítico final (*abajo*) los poblados se encontraban menos centralizados y se trasladaron más lejos, meseta adentro, entre los ríos. Las diversas zonas del paisaje se explotaban para actividades especializadas, según revela la distribución de utensilios tales como hachas y puntas de flecha.


4500 A. C.
BOSQUE DE ROBLES
BOSQUE RALO
PRADERA
100
75
50
25
0
PORCENTAJE DE ESTACIONES Y UTENSILIOS
3500 A. C.
100
75
50
25
0
PORCENTAJE DE ESTACIONES Y UTENSILIOS
2500 A. C.
SEPULCRO
POBLADOS
TUMBAS
HACHAS
PUNTAS DE FLECHA
100
75
50
25
0
PORCENTAJE DE ESTACIONES Y UTENSILIOS

convertido en una ciénaga. El estudio de las proporciones de isótopos de oxígeno de fósiles marinos del sur de Francia (que son sensibles a la temperatura) confirma una etapa fría a partir de 3500 a. de C., aproximadamente. Por entonces, en las regiones montañosas de Europa descendió la línea del arbolado, señal de un enfriamiento del clima.

Resulta más difícil documentar la presión social derivada de la escasez de tierra cultivable que los cambios climáticos, porque deja pocas huellas físicas. Sin embargo, parece probable que en el contexto de un clima en trance de empeorar, las comunidades del Neolítico medio experimentaran la presión de la escasez de tierra. A fin de cuentas, a comienzos del Neolítico medio, muchas islas aluviales habían estado ocupadas durante un intervalo de 500 a 1000 años. Tras un milenio de explotación, la tierra disponible pudo haber quedado exhausta, lo que propiciaría una violenta disputa por los campos fértiles.

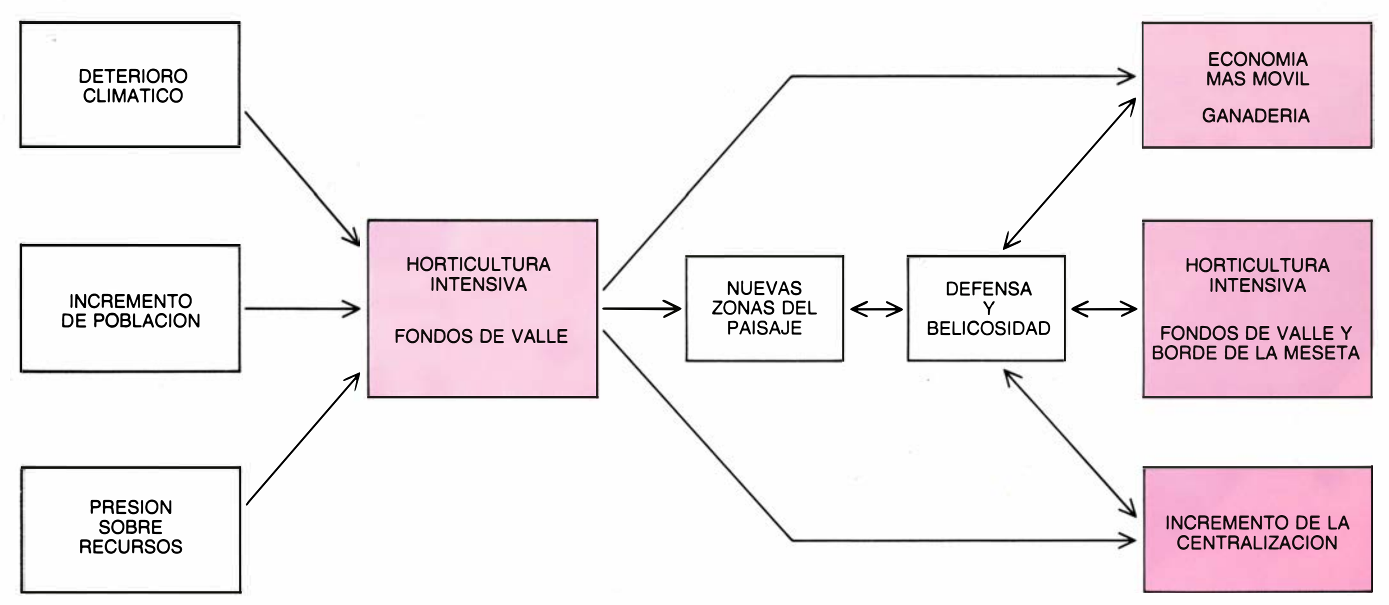
Sin duda harán falta más pruebas para que el modelo que hemos propuesto lineas atrás pueda confirmarse o rechazarse con rigor. Cualquiera que sea el resultado de ese proceso, está claro que a finales del Neolítico medio, hacia 2700 a. de C., habían empezado a producirse nuevos cambios. El comienzo del Neolítico tardío, en Francia, está jalonado por la formación de un nuevo agrupamiento cultural que recibe su nombre del Sena-Oise-Marne. Las estaciones típicas de la cultura del Sena-Oise-Marne son radicalmente distintas de las que caracterizan a las comunidades del Neolítico medio. Ya no se construyen los enormes recintos fortificados, y en su lugar se encuentran restos pequeños y diseminados, cada uno de los cuales señala el emplazamiento de la habitación de un grupo, acaso de una sola familia.

Aunque no están centralizadas del modo en que se hallan las estaciones del Neolítico medio, las viviendas del Neolítico tardío no se encuentran aisladas. El testimonio del curso superior del río Ourcq, cerca de la ciudad de Fère-en-Tardenois, revela que las casas se agrupaban en lo que podría llamarse una aldea distendida: una agrupación de edificios muy separados con un lugar de enterramiento como foco geográfico común. A veces ese lugar está señalado por medio de un monumento megalítico, pero las más de ellas se limita a una fosa común que llega a alojar hasta 200 enterramientos o más.

Un rasgo sorprendente de las agrupaciones del Neolítico final es el de su expansión: llega mucho más allá de los promontorios y penetra en la meseta. He diseñado una sencilla tipología del emplazamiento de estaciones del Neolítico final en el norte de Francia, y las he situado en zonas ecológicas. En ella se situaron cuatro tipos de hallazgos: casas, lugares de enterramiento, hachas y puntas de flecha. Las casas y las hachas se encontraron, de un modo muy característico, en la meseta y entre los ríos. Los lugares de enterramiento tienden a estar en laderas cubiertas del suelo delgado, calizo, denominado rendzina; las puntas de flecha era fácil que se encontrasen en laderas cubiertas de depósitos arenosos, probablemente buenos campos de caza.

Está claro, por tanto, que en la cultura del Neolítico tardío se desarrollaban diversas actividades en sus respectivas zonas del paisaje. Más significativo aún es que la agricultura (asociada con el emplazamiento de las casas) se había trasladado a la meseta, lo que conllevaba un cambio de economía. Como he señalado, el suelo próximo a la línea de manantiales, que proporcionaba la base a la agricultura del Neolítico medio, era lo bastante húmedo y fértil para labrarlo sin necesidad de arados pesados. En la meseta, regada principalmente por agua de lluvia, hace falta un arado pesado para remover el campo y llevar a la superficie tierra húmeda. Y en efecto, la aparición de la cultura del Sena-Oise-Marne es aproximadamente coetánea de la difusión del arado pesado y de los medios de tirar del mismo. Equipadas con estos aperos, algunas familias podían cultivar el terreno, anteriormente intratable, de la meseta, y alcanzar una independencia económica sin precedentes.

La introducción del arado parece haber constituido sólo un aspecto de la transformación económica general registrada durante el Neolítico final. Capas de carbón de estaciones ganadas al bosque durante el período Neolítico indican que el método de las parcelas fijas se había sustituido por el procedimiento de tala y quema. Corrobora esa conclusión el hecho de que la mayoría de las viviendas del Sena-Oise-Marne son pequeñas y se ocuparon brevemente, en comparación con el

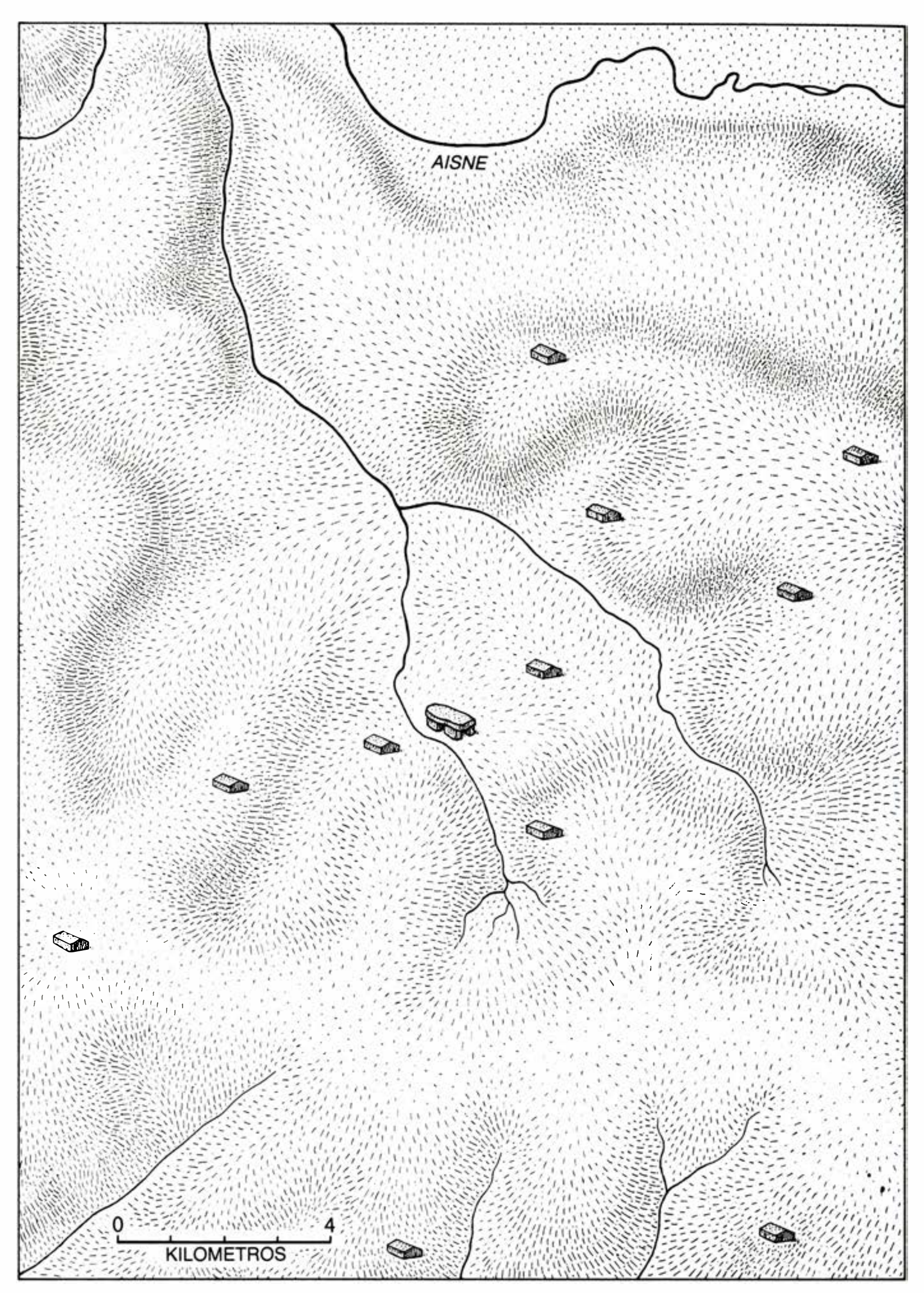


6. MODELO SUGERIDO POR EL AUTOR para explicar los cambios sociales registrados durante el período Neolítico medio, que se basa, en parte, en el deterioro climático. Un clima más lluvioso y más frío, combinado con incrementos de población, provocaría una presión sobre recursos tales como la tierra apta para la agricultura. La presión sobre los recursos pudo, a su vez, generar un clima de mayor belicosidad, con la consiguiente fortificación de las estaciones.

tiempo en que estuvieron en uso los lugares de enterramiento. También hay pruebas de que el cerdo (animal apropiado para las lindes de bosques recién desbrozados) incrementó considerablemente su importancia económica.

Teorías arqueológicas de última hora tienden a explicar la aparición simultánea del arado, la tracción y los nuevos animales domésticos como una "Revolución de Productos Secundarios", que en ciertas partes de Europa añadió la leche y la lana al inventario de los productos agrícolas. Efectivamente, en algunas regiones el desarrollo de la lana como cosecha-dinero, acompañada de la introducción de la metalurgia, señaló el final del período Neolítico tardío y el comienzo de la edad de Bronce. Una rama de la cultura del Sena-Oise-Marne (el grupo de Horgen, en Suiza) pasa por una transición de este género a partir de mediados del tercer milenio a. de C., aproximadamente.

En el territorio central de la cultura del Sena-Oise-Marne, en cambio, los buenos resultados de la expansión por la meseta parecen haber impedido ulteriores cambios sociales. En la comarca de París, la relación entre la superficie arable y la población era muy alta. A diferencia de otras regiones, Suiza incluida, donde la limitada disponibilidad de tierra provocaba una persistente presión demográfica, en buena parte de Francia la mera expansión permitió el mantenimiento de estructuras sociales y económicas que en otros sitios quedaron desplazadas por las innovaciones de la edad de Bronce.



7. HABITACIONES DEL NEOLITICO FINAL, con un monumento funerario como centro, cerca de la aldea de Vaux, al sur del valle del Aisne. La construcción de la tumba recuerda a la que se muestra en la figura 1. Probablemente fuera un lugar de enterramiento colectivo, aunque las pruebas de ello desaparecieron al ser saqueado en el siglo XIX. Las estaciones diseminadas alrededor de la tumba eran viviendas.

Parece, pues, que la presión sobre los recursos —en particular la presión demográfica sobre la superficie arable— constituyó una de las causas de los cambios sociales y culturales durante gran parte del Neolítico en el noroeste de Europa. La presión de la población parece haber sido uno de los factores clave, que determinó la concentración y fortificación de poblados que se producen durante el Neolítico medio. Además, la presión sobre los recursos contribuyó a que en países como Suiza e Inglaterra, con suelo arable limitado, la edad de Piedra acabase antes de que lo hiciese en la comarca del Sena-Oise y Marne, donde las mesetas ofrecían amplio campo para una expansión continua.

Quizá no deba sorprender la capital importancia de la tierra arable para la estructura social de una sociedad de agricultores primitivos. Pero esa importancia no podía comprenderse en el período Neolítico sin que los investigadores prestasen mayor atención a la distribución espacial, tanto en la escala europea como en la escala, menor, de las áreas locales. Más aún, el mapa de distribución constituye uno de los instrumentos que ha sobrevivido a la notable transformación sufrida por la arqueología en fechas recientes, de la que ha salido a flote en medio del respeto acrecentado de los estudiosos.

Se habla hoy de "nueva arqueología" para designar enfoques arqueológicos que se formularon en la década de 1960. En contraste con la "vieja arqueología", en su mayor parte empírica y que rechazaba las teorías de largo alcance, la "nueva" se alimenta en gran medida de teorías nacidas en los campos de la antropología, la lingüística y la geografía.

Los usos del mapa de distribución reflejan esos cambios fundamentales en materia de arqueología. En lugar de mero instrumento de localización, esos mapas se han convertido en el punto de partida de refinadas teorías que pretenden explicar acontecimientos subyacentes. Así ha sucedido en el caso del período Neolítico en el noroeste de Europa. Partiendo de conceptos espaciales como el de células de poblamiento, centralización y dispersión, y el de zonas ecológicas, se han explicado algunas de las fuerzas subyacentes que determinaron la forma que asumió la agricultura primitiva en las llanuras del norte de Europa.

La interfase gas-líquido

El estudio termodinámico y mecánico de la interfase gas-líquido permite comprender la noción de tensión interfacial. Su modificación por tensioactivos cambia el proceso de transferencia de materia entre la fase líquida y el gas

Claudi Mans, Joan Llorens y José Costa López

En las condiciones habituales de nuestro entorno la materia se nos presenta en conjuntos físicamente homogéneos que denominamos fases. Hablamos así de la fase sólida, la fase líquida o la fase gaseosa. Si en lugar de considerar las propiedades macroscópicas de la materia se atiende a su estructura atómico-molecular se observa que existen estados de ordenación muy diversos. En un extremo tenemos la fase gaseosa, que corresponde a un estado diluido y totalmente desordenado de la materia; en el otro, en el dominio de la materia condensada, hallamos diferentes grados de ordenación, que van desde la fase líquida clásica hasta la fase sólida cristalina, en donde existe un orden molecular riguroso, pasando por las mesofases o cristales líquidos. Otro estado de la materia menos habitual en la vida cotidiana es la fase plasma, formada por la materia ionizada, de enorme interés en campos tan dispares como la cosmología y la energía de fusión.

Entre dos fases cualesquiera existe siempre una zona de separación o de unión, según se mire, denominada interfase, constituida por materia cuyas propiedades son intermedias entre las de las dos fases adyacentes. El espesor de una interfase depende del tipo y condiciones de las fases presentes. Una interfase gas-líquido se caracteriza por su escaso espesor; y para conocer sus propiedades conviene comprender primero las de las dos fases que la definen.

El modelo teórico más sencillo para describir las propiedades de la fase gaseosa, o fase gas, como la llamaremos en adelante, es la teoría cinética de los gases perfectos. En su marco, se considera que la fase gas está formada por un gran número de partículas en constante movimiento, que chocan entre sí y con las paredes de una manera totalmente elástica. Las fuerzas de atracción o repulsión entre tales partículas son despreciables. Además, ocupan éstas un escaso volumen en relación al volumen del recipiente que las contiene. El choque de las partículas con las paredes del recipiente genera una presión, P, que se ajusta a la ecuación de estado de los gases perfectos: la presión ejercida es igual al producto de tres factores, la densidad de partículas o moléculas por unidad de volumen (n), la constante de Boltzmann (k) y la temperatura absoluta (T).

En realidad, esa ecuación sólo se cumple exactamente cuando se trata de concentraciones moleculares bajas, puesto que a mayores concentraciones la interacción molecular deja de ser despreciable y empieza a adquirir importancia el volumen ocupado por las propias moléculas. Otras ecuaciones de estado incluyen nuevos términos en la ecuación de estado, que tienen en cuanta esas desviaciones de la situación ideal. Ahora bien, incluso para los gases no ideales, la principal característica a considerar sigue siendo la movilidad de las moléculas y la escasa interacción entre éstas.

El estado líquido se caracteriza por la movilidad de sus moléculas y por una interacción molecular bastante intensa. En ese estado las fuerzas intermoleculares restringen el movimiento, sin impedirlo; por esta razón los líquidos son mucho más viscosos que los gases.

Mientras que el estado gas ha sido objeto de intensa investigación a lo largo de la historia, y el sólido constituye hoy uno de los campos más fecundos de la física, el estado líquido, no obstante su extraordinario interés en la química y otros ámbitos, no ha recibido idéntica atención. Tres enfoques se han seguido a la hora de abordarlo: el estado líquido entendido como un sólido modificado, el estado líquido entendido como un gas modificado y el estado líquido entendido como un estado peculiar. Esta tercera aproximación parece hoy la más idónea.

La difracción de rayos X en un sólido cristalino muestra máximos de difracción muy definidos y a distancias determinadas en virtud de su orden molecular intrínseco. Si se acomete un análisis de difracción de rayos X de una fase gas, no se observa ninguna difracción coherente porque en tal situación no existe orden molecular. Pero si de un líquido se trata, encontraremos una difracción coherente, aunque con unos máximos de difracción mucho más difuminados que los registrados en un sólido cristalino.

Del análisis de difracción de rayos X se puede obtener la función de distribución radial desde un punto cualquiera de la fase. Ello consiste en imaginar esferas concéntricas sobre una molécula cualquiera, tomada como origen, de suerte que el volumen comprendido entre dos esferas consecutivas sea constante, para determinar luego el cociente entre el número de moléculas existente en cada una de esas capas esféricas y el número de moléculas que le correspondería si la densidad molecular fuera completamente uniforme. Si se analiza la función de distribución radial en el sólido, se observa que la materia se concentra en múltiples intervalos, muy estrechos, que se reparten de manera regular por la fase.

Sin embargo, en el líquido la función de distribución radial presenta unos cuantos máximos, muy pocos, difuminados en la región más próxima a la

1. DOS INTERFASES AIRE-AGUA DISTINTAS en la depuración de aguas residuales urbanas. El sedimentador (*foto superior*) muestra una interfase gas-líquido en aparente reposo, con la típica ondulación interfacial generada por el viento. No se persigue en esta etapa la transferencia de oxígeno a través de la interfase. En el aireador (*foto inferior*) los agitadores aumentan la superficie interfacial aire-agua. De ese modo, aumenta notablemente la transferencia del oxígeno del aire al agua, favoreciéndose la depuración.

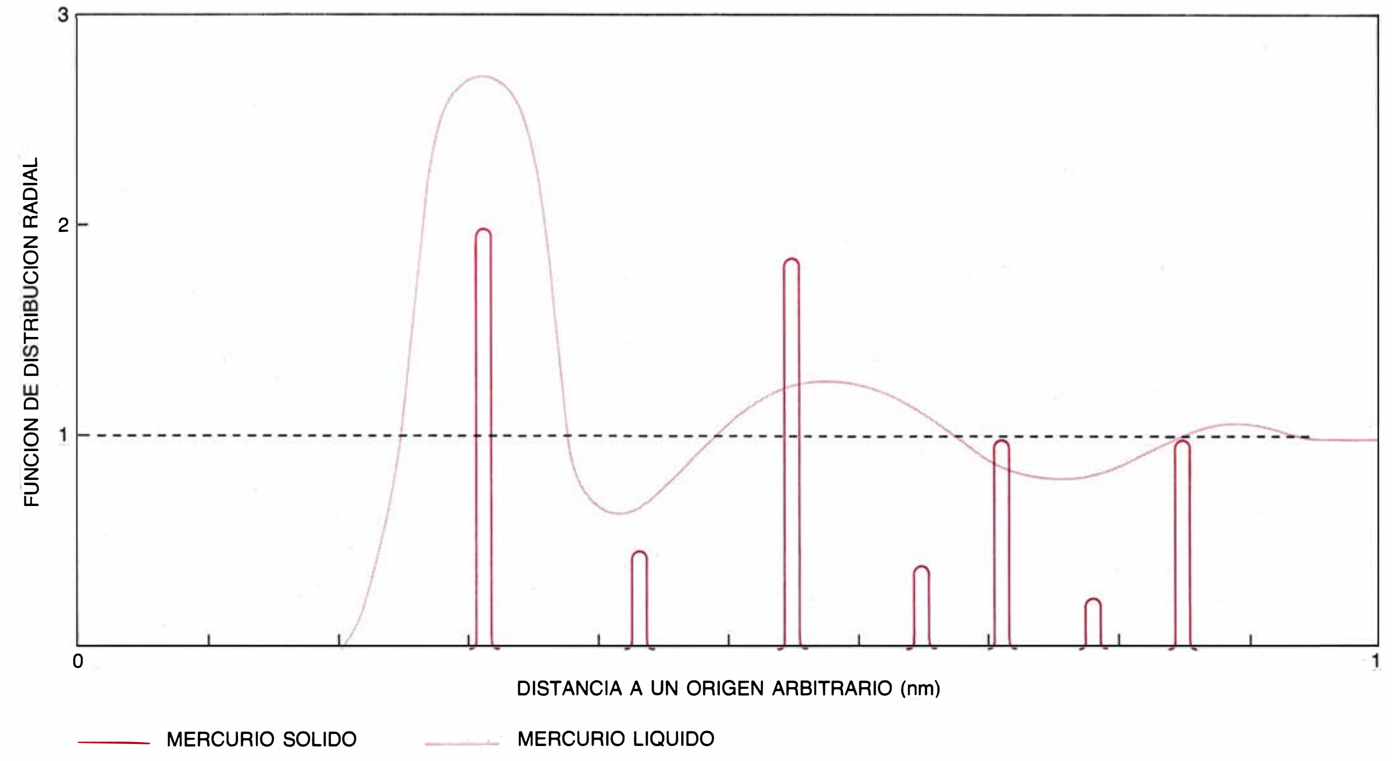
molécula tomada como origen; a distancias mayores, la materia se nos ofrece como si estuviera uniformemente repartida. Por consiguiente, en el estado líquido existe cierto orden molecular a distancias cortas, por lo que se puede considerar que el líquido está constituido por pequeños grupos de moléculas o átomos que mantienen cierta regularidad interna, pero que no guardan ese orden entre grupos. Esa ausencia de orden molecular a distancias largas hace que los líquidos se asemejen, hasta cierto punto, a los sólidos amorfos (polímeros y vidrios), materiales que, por otra parte, fluyen de un modo viscoso como los líquidos, eso sí, con una viscosidad muy superior.

La interfase gas-líquido posee propiedades distintas de las que caracterizan a la fase gas y de las propias de la fase líquida que la rodean. Dentro de la interfase, todas las propiedades van cambiando gradualmente al pasar de una fase a la otra; esto hace que la interfase, a diferencia de la fase, no sea isótropa, sino anisótropa (es decir, que sus propiedades no sean las mismas en todas las direcciones). Los principios de la física y la química permiten diseñar modelos teóricos generales de las interfases y, a través de los mismos, inferir muchas de sus características que, por vía experimental, resultan muy difíciles de comprobar. Piénsese que el espesor de una interfase gas-líquido viene a ser de escasos diámetros moleculares; intentar determinar, a través de la misma, el perfil de densidad constituye una pretensión inabordable con nuestros medios experimentales.

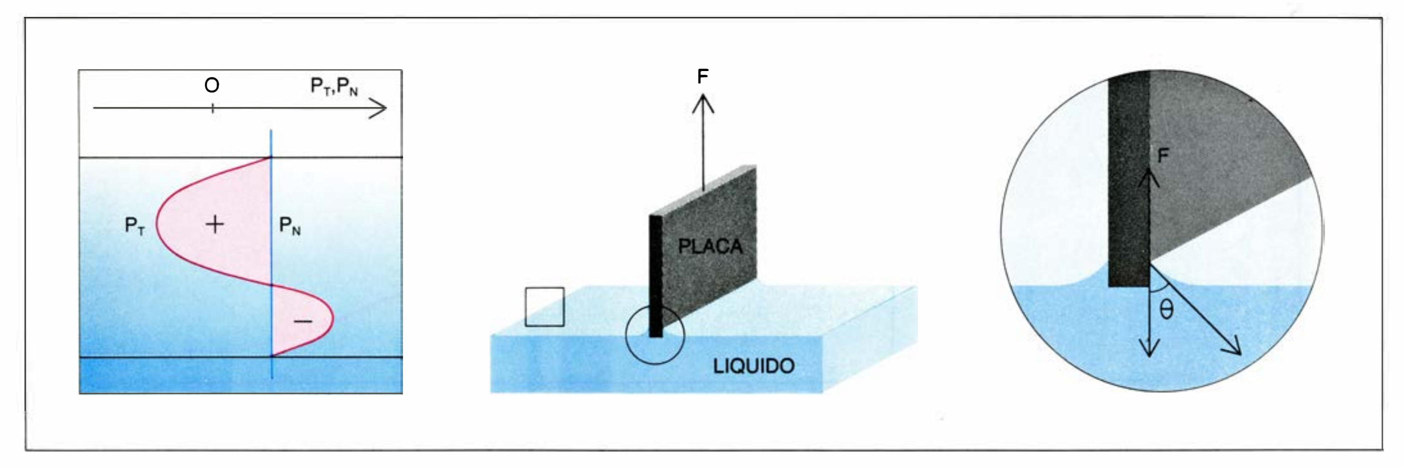
El estudio teórico de las interfases puede plantearse desde dos enfoques independientes, aunque en cierto modo complementarios: el tratamiento mecánico y el tratamiento termodinámico, ambos tanto en su vertiente macroscópica como en su vertiente atómico-molecular.

¿Qué dice el planteamiento termodinámico? Una forma del segundo principio de la termodinámica establece que, en un sistema que no intercambia ni materia ni energía con su entorno, cualquier cambio espontáneo, en una transformación natural, es decir, irreversible, procede en el sentido de aumentar su entropía, S.

De acuerdo con otra forma alternativa del segundo principio de la termodinámica, en un sistema sujeto a temperatura y volumen constantes cualquier cambio espontáneo va en el sentido de que, en el equilibrio, la energía libre de Helmholtz sea mínima. La energía libre de Helmholtz, F, se define según la relación $F = E - TS$, donde E es la energía interna y T la temperatura absoluta del sistema. Consideremos un sistema que se halle en esas condiciones, formado por una sustancia líquida en equilibrio con su vapor y que presente una determinada área interfacial. Cualquier aumento que se produzca en el área interfacial del sistema implicará un alejamiento del equilibrio y, en consecuencia, producirá un aumento positivo de la energía libre del sistema. Si imaginásemos que la energía libre del sistema disminuyera al aumentar el área interfacial, ésta tendería espontáneamente a crecer sin límites y la energía libre del sistema iría disminuyendo: el líquido se dividiría en porciones, tan pequeñas que se obtendría una única fase gas, sin interfase gas-líquido, y con una energía libre



2. CONOCIMIENTO DEL ESTADO DE ORDENACION de una fase de un cuerpo a través del análisis de difracción de rayos X. En efecto, a partir de los datos de difracción de rayos X se obtiene la función de distribución radial de la materia de una fase (gas, líquida o sólida). En la figura se ilustra la función de distribución radial para el caso del mercurio líquido y el del mercurio sólido. La función de distribución radial se obtiene imaginando esferas concéntricas sobre una molécula cualquiera de la fase, tomada como origen, de forma que el volumen comprendido entre dos esferas consecutivas sea constante; luego, se determina el cociente entre el número de moléculas existente en cada capa esférica y el número de moléculas que le correspondería si la densidad molecular fuera enteramente uniforme. Si se analiza la función de distribución radial en el sólido, se observa que la materia está concentrada en múltiples y estrechos intervalos que se reparten de una manera regular a lo largo de toda la fase. En el líquido, sin embargo, la función de distribución radial presenta sólo unos cuantos máximos difuminados en la región inmediata a la molécula tomada como origen, y, a distancias mayores, la materia se presenta como si estuviera uniformemente repartida. Eso sugiere que, en el estado líquido, la posición de una molécula —sita alrededor de la molécula tomada por origen— no está completamente indeterminada, a diferencia de lo que sucede en un gas. Por consiguiente, en el estado líquido existe cierto orden molecular a distancias cortas, que nos faculta para entender el líquido constituido por pequeños grupos de moléculas o átomos que mantienen determinado orden interno, si bien no lo guardan entre grupos. Al aumentar la distancia al origen, la función de distribución radial de la fase líquida tiende a la unidad (densidad uniforme), mientras que en la fase sólida cada máximo tiende a ser infinitamente estrecho y alto a lo largo de toda la fase. Los sólidos amorfos presentan características parecidas a los líquidos.



3. PLACA DE WILHELMY para medir la tensión interfacial. Se trata de un procedimiento sencillo y directo que mide la fuerza que ejerce el menisco del líquido sobre una placa metálica vertical cuando se halla en contacto con el líquido y con su extremo inferior, justo al mismo nivel que el nivel del líquido. Existe una relación sencilla entre la tensión interfacial del líquido, la fuerza que actúa sobre la placa y el ángulo del menisco o ángulo de contacto. Desde el punto de vista mecánico, la tensión interfacial viene dada por el valor del área comprendida entre los valores de la tracción normal, *Pn*, y la tracción transversal, *Pt*, a lo largo del espesor de la interfase; se calcula de suerte que el área es positiva cuando *Pn* es mayor que *Pt*, y negativa en caso contrario. La estabilidad de la interfase exige que el valor de la tensión interfacial sea positivo; en lógica coherencia, en la mayor parte del espesor de la interfase el valor de *Pt* será menor que el valor de *Pn*. En una interfase estable pueden coexistir regiones en tensión, con *Pn* mayor que *Pt*, y regiones en compresión, con *Pn* menor que *Pt*, siempre que las primeras abunden más que las segundas. En virtud de lo cual, en la interfase hay siempre una tensión: para aumentar el área interfacial, es decir, para estirar la interfase, debe aplicarse una fuerza igual y contraria a la tensión interfacial. Esto es precisamente lo que hace el artificio de la placa de Wilhelmy.

menor y, por ende, más estable. La mera existencia de interfases gas-líquido constituye una prueba de que, para aumentar el área interfacial, hay que elevar la energía libre del sistema. El valor positivo del incremento de energía libre del sistema al aumentar el área superficial constituye, pues, una medida de la estabilidad de la interfase. A esa energía libre asociada al área interfacial se la denomina tensión interfacial, γ, y es siempre positiva en una interfase estable. (El concepto de tensión interfacial no se limita a las interfases gas-líquido, sino que se aplica a todo tipo de interfases. En la interfase gas-líquido, la tensión interfacial se la conoce también por tensión superficial.)

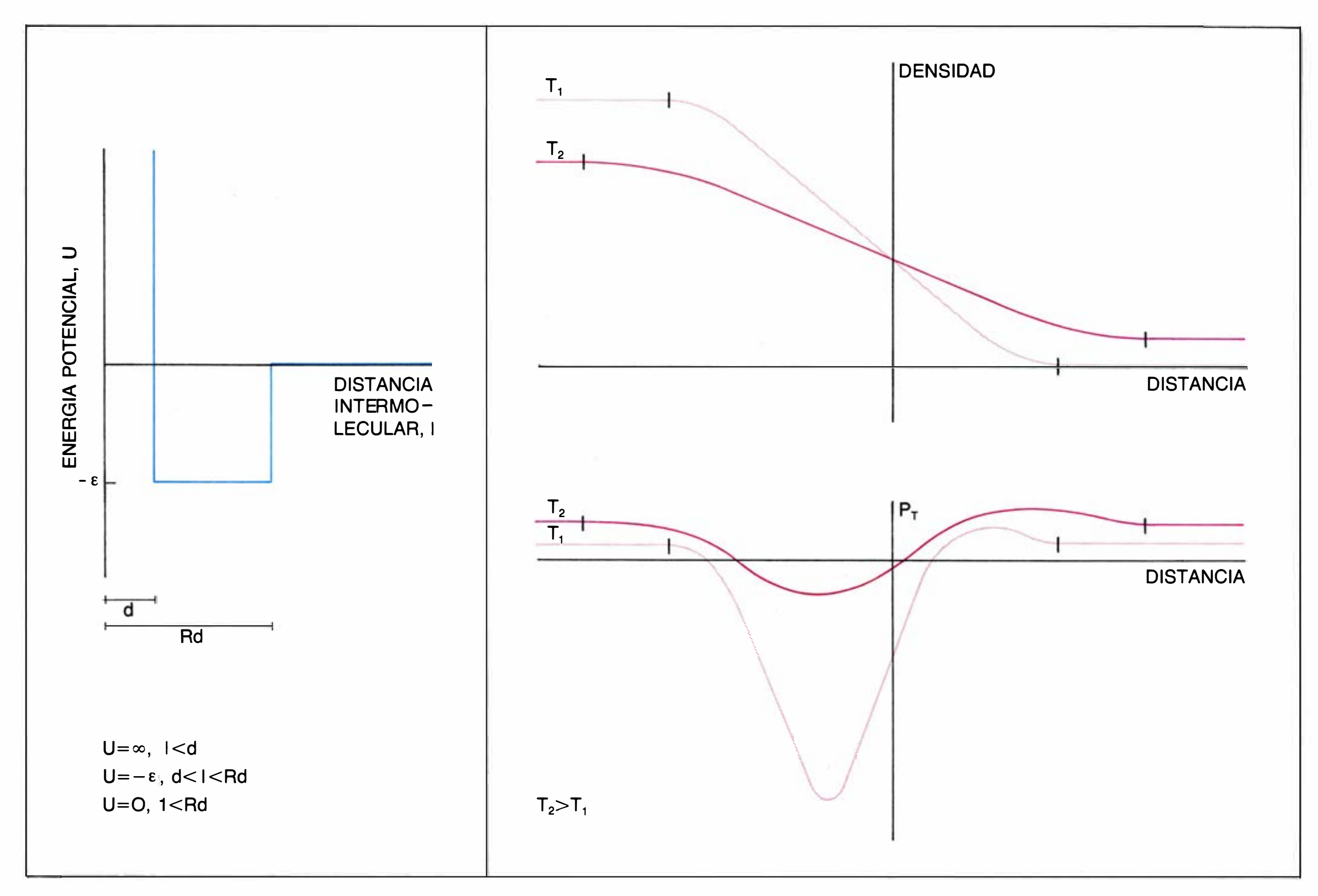
Uno de los principales avances en el estudio de la interfase gas-líquido ha sido, sin duda, el desarrollo de la teoría mecánica de las interfases. En mecánica de fluidos, se llama presión a la fuerza que ejerce la materia situada a un lado de una superficie unidad sobre la materia situada al otro lado. Dentro de cualquier fase fluida isotrópica, la fuerza ejercida a través de esa superficie es independiente de la orientación y posición que la superficie tenga en el espacio. En la interfase, sin embargo, y debido a la anisotropía, la fuerza ejercida a través de una superficie por la materia situada a un lado de dicha superficie sí depende de su orientación y posición. Por tanto, en la interfase, la presión en un punto, que debe ser una propiedad característica del fluido e independiente de la orientación de la superficie sobre la cual se mide, no puede representarse por medio de un solo valor.

En un sistema de coordenadas dado, la orientación en el espacio de una superficie viene indicada por tres números, al igual que cualquier otro vector. En un sentido completamente general, la presión se representa, entonces, como un tensor o conjunto de nueve números ordenados en tres filas y tres columnas. Cada uno de estos números o componentes mide la contribución a la presión de las fuerzas o tracciones ejercidas a través de las distintas orientaciones de la superficie. Si de un planteamiento general pasamos a una fase fluida en equilibrio hidrostático, o mecánico, el tensor de la presión tiene entonces todos sus elementos iguales a cero, salvo los tres elementos de la diagonal principal del tensor, que equivalen, todos, al valor de la presión medida en dicha fase.

Consideremos, en cambio, una interfase plana en equilibrio hidrostático, con un sistema de coordenadas rectangulares con dos de sus ejes situados en el plano de la interfase. También en este caso el tensor de la presión tiene sus elementos iguales a cero, salvo los tres elementos de la diagonal principal, pero ahora uno de esos valores difiere de los otros dos, que son iguales entre sí. Ese valor distinto de los otros dos representa la tracción normal a la interfase, *Pn*; cuando hay equilibrio mecánico, este valor debe ser constante en cualquier punto de la interfase e igual a la presión de ambas fases. Los otros dos valores representan la tracción transversal, *Pt*; son iguales entre sí, debido a que, por la propia geometría del sistema, todas las propiedades medidas en cualquier dirección sobre un mismo plano paralelo a la interfase deben ser iguales. El valor de la tracción transversal, a diferencia de lo que ocurre con el de la tracción normal a la interfase, varía a través del espesor de la interfase y se iguala a *Pn*, como se dijo antes, fuera de la región interfacial pero dentro del dominio de cada fase. Importa resaltar, además, que la condición de equilibrio hidrostático, o igualdad de *Pn* a través de la interfase, implica la existencia de equilibrio termodinámico, es decir, un valor mínimo para la energía libre. Dicho con otras palabras: el equilibrio mecánico implica, asimismo, un equilibrio químico.

La tensión interfacial puede determinarse también como una tensión mecánica sin hacer referencia obligada a la existencia de las leyes de la termodinámica. En principio, el valor de *Pt* puede ser mayor o menor que el de *Pn*. Las regiones de la interfase en que *Pt* alcance valores superiores a *Pn* serán regiones "en compresión", mientras que las regiones en que *Pt* sea inferior a *Pn* serán regiones "en tensión". Las primeras tienden a aumentar el área interfacial, en tanto que las segundas muestran la inclinación opuesta. Desde esta perspectiva, el valor de la tensión interfacial viene dado por el valor del área comprendida entre las representaciones de *Pn* y *Pt* a través del espesor de la interfase, calculada de forma que el área resulta positiva cuando *Pn* es mayor que *Pt*, y negativa en el caso contrario.

Puesto que la estabilidad de la interfase exige que el valor de la tensión interfacial sea siempre positivo, en la mayor parte del espesor de la interfase el



4. **PARA CALCULAR LA TENSION INTERFACIAL, tau, es necesario conocer los valores de la tracción transversal en la interfase, *Pt*. Si se considera una interfase plana y se aplica la teoría del gradiente de densidad en la interfase, según la cual la densidad en la interfase varía de una forma gradual, uniforme y continua desde la fase líquida hasta la fase gas, se obtiene que $Pt = (1/3)\ Pn + (2/3)\ Po$, donde *Po* es el valor de la presión calculado a partir de una ecuación de estado. Para calcular estos valores de *Po* a través de la interfase hay que conocer la densidad en cada punto de la interfase, lo que implica establecer un modelo de interacción molecular. Uno de los modelos más interesantes por su simplicidad es el del potencial de foso cuadrado. De acuerdo con el mismo, se considera que dos partículas situadas a distancias superiores a cierto valor no tienen interacción molecular, y la energía potencial es nula; al disminuir la distancia intermolecular, la energía potencial cae bruscamente a un valor negativo y constante (pozo de potencial), hasta que al llegar a otra distancia determinada las fuerzas de repulsión entre partículas son tan grandes que la energía potencial se hace infinita. Con la teoría del gradiente, y con el modelo de interacción molecular con energía potencial de foso cuadrado, se han calculado los perfiles de densidad en la interfase y los valores de tensión superficial a diversas temperaturas. De estos resultados se desprende que, al aumentar la temperatura, los valores calculados para el espesor de la interfase aumentan, mientras que disminuyen los valores de tensión interfacial. Resultados que concuerdan con lo que se obtiene experimentalmente y refrendan así este modelo simplificado.**

valor de *Pt* deberá ser menor que el valor de *Pn*. Por consiguiente, si bien en una interfase estable pueden coexistir regiones en tensión y regiones en compresión, siempre las primeras abundarán más que las segundas. De donde se infiere que, para aumentar el área interfacial, es decir, para estirarla, se ha de aplicar una fuerza igual y contraria a la que ejerce la tensión interfacial.

Aunque hay varios procedimientos para medir el valor de la tensión interfacial, quizás uno de los más sencillos y directos sea el de la placa de Wilhelmy, con la que se determina la fuerza que ejerce el menisco del líquido sobre una placa metálica vertical cuyo extremo inferior está en el mismo nivel que la superficie del líquido. La fuerza sobre la placa es igual al producto de la tensión interfacial del líquido por el perímetro mojado de la placa y por el coseno del ángulo de contacto.

Cuando una interfase no es plana, ni *Pn* ni *Pt* son constantes a través de la interfase. Fuera de ésta, y dentro de cada fase, ambos valores son constantes e iguales entre sí, pero a diferencia de lo que sucede con la interfase plana, esos valores difieren de una a otra fase. Por consiguiente, las presiones medidas en fases separadas por una interfase curvada no son iguales. Si el espesor de la región interfacial es pequeño comparado con el radio de curvatura de la interfase, *R*, entonces la diferencia de presiones entre esas dos fases vale $\gamma\ (2\ /\ R)$. A esta relación se la denomina ecuación de la capilaridad de Young-Laplace, y explica fenómenos tales como el ascenso de un líquido por un capilar o el aumento de la presión de vapor de un líquido cuando se atomiza dentro de una fase gas en gotas muy pequeñas.

¿Qué relación existirá entre el tensor de la presión -una variable macroscópica- y la estructura atómico-molecular del fluido? Desde el punto de vista molecular, en el tensor de la presión distinguimos la contribución de dos factores: el cinético, que corresponde a la energía térmica de las moléculas, y el relativo a las fuerzas intermoleculares. La contribución cinética al tensor de la presión depende sólo de la temperatura; en un sistema en equilibrio térmico, dicha componente es isótropa. Afirmar, pues, que el tensor de la presión es anisótropo en la interfase equivale a decir que las fuerzas intermoleculares ejercidas sobre las moléculas de la interfase son también anisótropas.

La intensidad de la fuerza que ejercen las moléculas vecinas sobre una molécula cualquiera depende del número que de aquéllas haya dentro de una distancia igual al rango de las fuerzas intermoleculares. En el entorno de una molécula cualquiera de la interfase hay siempre más densidad molecular en el lado más próximo a la fase líquida que en el lado más próximo a la fase

gas. Por tanto, las fuerzas sobre dicha molécula dependerán de la dirección que se considere y, en consecuencia, no habrá isotropía. Si se impone la condición de equilibrio hidrostático —*Pn* constante a través de la interfase— se obtiene una relación matemática entre los componentes del tensor de la presión a través de la interfase, las fuerzas intermoleculares y la distribución de la densidad en la interfase. Actualmente, esa relación matemática no se puede resolver de una forma rigurosa. Y así se recurre a una simplificación útil para obtener soluciones prácticas: introducir la teoría del gradiente de la distribución de la densidad en la interfase. Esta teoría, que arranca de los trabajos de Rayleigh y van der Waals, postula la existencia, a través de la interfase, de una variación gradual y continua de la densidad desde la fase líquida hasta la fase gas.

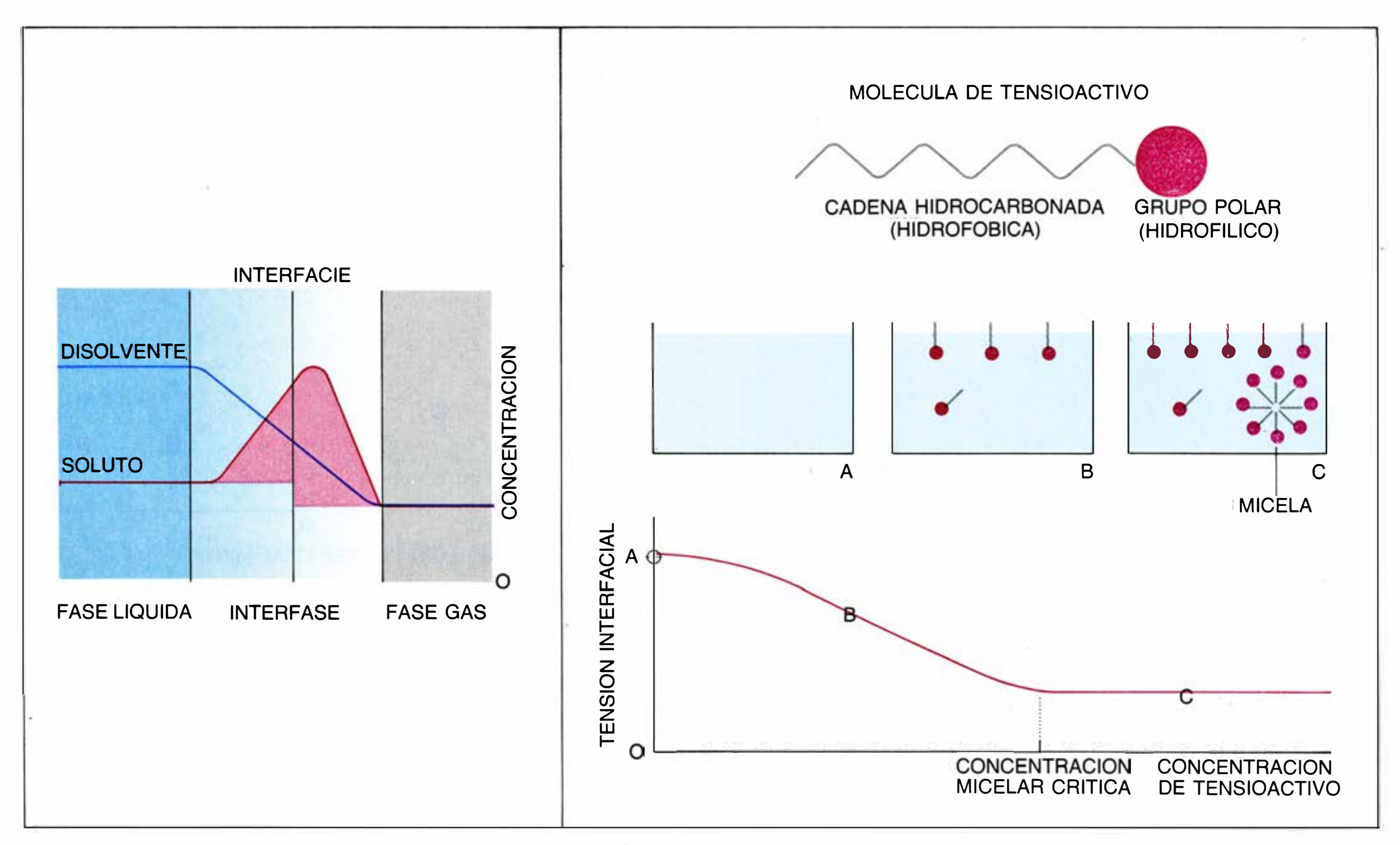
Vemos, pues, en esa afirmación un cambio importante con respecto a la primitiva teoría de Young y Laplace, partidarios de la opinión según la cual la densidad cambiaba bruscamente al pasar de una fase a la otra.

Aplicando la teoría del gradiente de la densidad a una interfase plana resulta que $Pt = (1/3)\ Pn + (2/3)\ Po$, donde *Po* es el valor de la presión calculado a partir de una ecuación de estado, ecuación que relaciona, en una fase homogénea, la presión *Po* con la temperatura y la densidad. El valor calculado para *Po* va cambiando a través del espesor de la interfase, conforme se modifica la densidad; no ocurre así con *Pn*, que es constante para mantener el equilibrio mecánico.

La ecuación de estado a utilizar debe tomar en consideración la interacción molecular y el volumen ocupado por las propias moléculas, siendo la ecuación de van der Waals una de las más empleadas. Dentro de una fase, no todos los valores de *Po* y de densidad calculados con la ecuación de van der Waals se mantienen físicamente estables; además, esos valores de *Po* se obtienen en el cálculo de *Pt* a través de la interfase. Se cree que el propio gradiente de densidad de la interfase estabiliza dichos valores de *Po* en la interfase, por cuya razón resultaría adecuada la utilización de la ecuación de estado de van der Waals en la interfase.

Para calcular el valor de la tensión interfacial es necesario conocer el valor de *Pt* a través de la interfase, lo que, a su vez, implica conocer el perfil de la densidad en la interfase. Podemos determinar la densidad en la interfase averiguando las interacciones moleculares. A este propósito, uno de los modelos de interacción más convenientes por su simplicidad es el denominado modelo de potencial de foso cuadrado. Se supone en éste que dos partículas situadas a distancias superiores a cierto valor no tienen interacción molecular y la energía potencial es nula. Al disminuir la distancia, la energía potencial cae bruscamente a un valor negativo y constante (pozo de potencial), hasta que, al llegar a otra distancia determinada, las fuerzas de repulsión entre partículas adquieren tal intensidad que la energía potencial deviene infinita.

Con la teoría del gradiente, y con el modelo de interacción molecular con energía potencial de foso cuadrado, se han calculado los perfiles de densidad en la interfase, así como los valores de



5. NOCION DE EXCESO INTERFACIAL introducida por Gibbs. Se basa en suponer una interfaz, o superficie de espesor nulo, en la interfase y considerar que las dos porciones separadas por aquélla son homogéneas hasta la misma, produciéndose en dicha interfaz un cambio brusco de propiedades. Si un componente se concentra en la interfase, puesto que consideramos que ambas fases son homogéneas hasta la interfaz, quedará una cantidad del componente en cuestión sin contabilizar en ninguna de las dos fases, y habrá que asociarla a la interfaz. Esa cantidad, divida por el área de la interfaz, constituye el exceso interfacial del componente. La noción de exceso interfacial resulta válida también para otras propiedades distintas de la propia concentración. En principio, la situación de la interfaz dentro de la interfase es arbitraria. Lo que no obsta para que la posición más conveniente sea la que provoca que el exceso de concentración interfacial de disolvente sea nulo. Partiendo de los principios de la termodinámica se demuestra que, cuando un componente posee un exceso de concentración interfacial positivo, la tensión interfacial disminuye. Los tensioactivos son sustancias que se concentran en la interfase y rebajan notablemente la tensión interfacial. Cuando la interfase se encuentra saturada de tensioactivo, y seguimos incorporando más, las moléculas de tensioactivo se asocian entre sí, dentro de la fase acuosa, formando grandes paquetes moleculares: las micelas. Estas presentan, en la fase acuosa, una envoltura hidrofílica.

tensión interfacial a diversas temperaturas. De esos resultados se observa que, en la interfase, hay regiones en compresión, con *Pn* menor que *Pt*, y regiones en tensión, más abundantes que las anteriores, con *Pn* mayor que *Pt*. Además, al aumentar la temperatura, los valores calculados para el espesor de la interfase crecen también, en tanto que disminuyen los valores calculados para la tensión interfacial. Resultados todos ellos que concuerdan con lo que nos muestra la experimentación y refrendan la validez de ese modelo simplificado. La resolución de modelos matemáticos más rigurosos —y mucho más complejos— conduce a resultados similares.

Pero los resultados en cuestión se han obtenido para un sistema de un único componente: un líquido puro en equilibrio con su vapor. Mas si consideramos un sistema de dos componentes, formado por un soluto y un disolvente, en equilibrio entre sí y con la fase vapor, la concentración de soluto que haya en la interfase diferirá de la concentración de soluto que encontramos en cada fase. La teoría mecánica de las interfases, que es la herramienta con que hemos venido trabajando, ofrece especial atractivo merced a su carácter general, intuitivo y fácilmente representable.

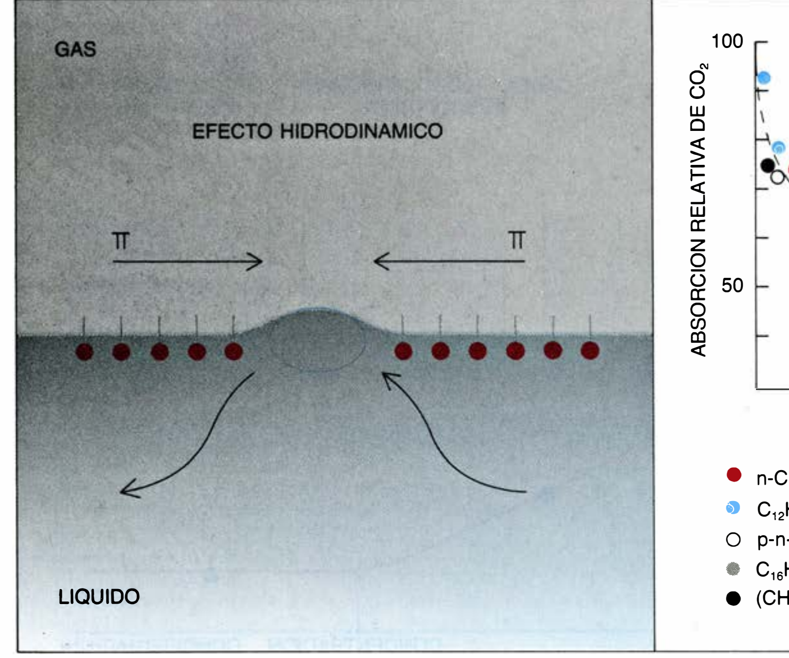
De acuerdo con la teoría mecánica, en un sistema multicomponente en equilibrio todos los componentes del sistema se distribuyen entre las fases y la interfase de suerte tal que exista un equilibrio hidrostático para cada uno de los componentes. Sin embargo, en sistemas de varios componentes la termodinámica, a diferencia de la teoría mecánica, proporciona información sobre las propiedades de la interfase con un tratamiento matemático mucho más simple.

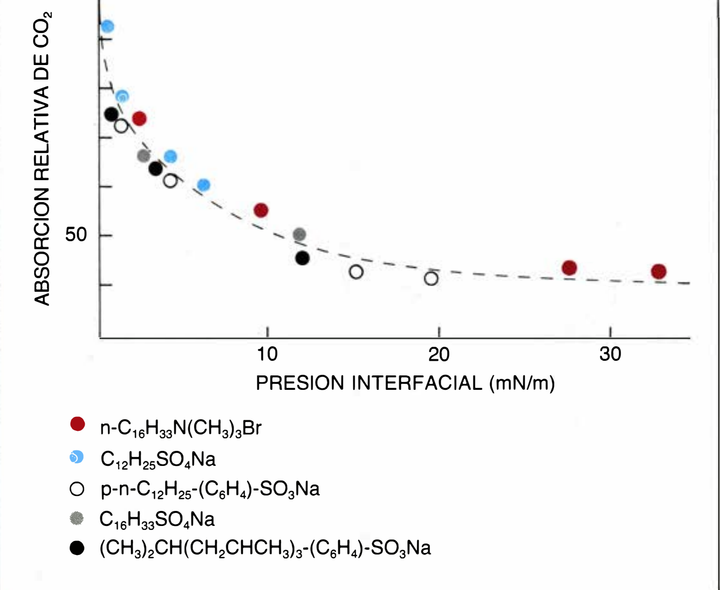
En términos termodinámicos, para obtener la distribución entre las fases y la interfase, en una situación de equilibrio, de los distintos componentes del sistema es necesario introducir el concepto de potencial químico. Se trata de un concepto parecido al de la temperatura, que se iguala en todos los puntos de un sistema que se encuentre en equilibrio térmico.

El potencial químico de un componente del sistema en un punto de dicho sistema se define como el cambio de energía libre cuando se agrega una molécula del componente en cuestión en ese punto y se mantienen constantes la temperatura, el volumen y la distribución de los demás componentes. La distribución de todos los componentes entre las fases y la interfase es entonces tal, que, en equilibrio, el potencial químico de cada componente es el mismo en cualquier punto del sistema.

Para estudiar los sistemas de varios componentes, Gibbs introdujo la noción de "exceso interfacial". Este concepto surge de imaginar una hipotética superficie de espesor nulo, una interfaz, en el interior de la interfase, de forma que se pueda considerar que las dos fases separadas por esa superficie son homogéneas hasta allí donde se produce el cambio brusco de propiedades. Si un componente o una propiedad se concentran en la interfase, al suponer homogéneas hasta la interfaz ambas fases, queda parte de esa componente o propiedad que, por no estar contabilizada en ninguna de las dos fases, hay que asociarla a la interfaz; esa cantidad, dividida por el área de la interfaz, es el exceso interfacial de la componente o propiedad en cuestión.

Naturalmente, este concepto introducido por Gibbs no constituye ningún modelo de la interfase, sino una mera forma ingeniosa de describir sus propiedades, que, según hemos visto, en realidad cambian gradualmente dentro del espesor de la interfase. En principio, la situación de la interfaz dentro de



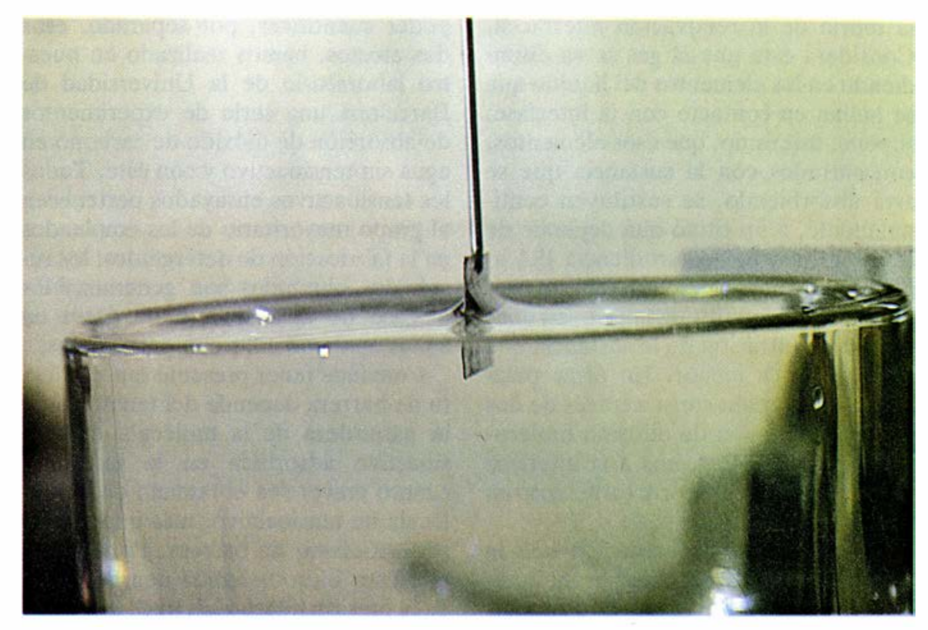


6. INCIDENCIA DE LOS TENSIOACTIVOS en la adsorción de un gas. Los experimentos llevados a cabo en el laboratorio de los autores demuestran que la adsorción de un gas, en un líquido en movimiento, desciende hasta un 40 por ciento cuando se introducen pequeñas cantidades de tensioactivo. Hay dos efectos principales de los tensioactivos que disminuyen la adsorción de un gas en un líquido: el efecto de barrera y el efecto hidrodinámico. El efecto de barrera consiste en que el tensioactivo "tapona" el paso de las moléculas de gas hacia el interior del líquido; el efecto hidrodinámico estriba en la disminución de la renovación interfacial de los elementos de líquido en contacto con la interfase. Según el efecto hidrodinámico, cuando un elemento de líquido en contacto con la interfase se sustituye por un elemento de líquido del interior de la fase se produce localmente, en la interfase, un aumento de la tensión interfacial, toda vez que el elemento de líquido recién llegado a la interfase no ha tenido tiempo todavía de concentrar el tensioactivo en la interfase; en consecuencia, su tensión interfacial viene a ser la misma que la del líquido carente de tensioactivo. El aumento de la tensión interfacial implica la elevación de la energía libre y, por ende, un cambio desfavorable. En virtud de ello, los elementos de líquido en contacto con la interfase con tensioactivo adsorbido son muy estables y se resisten a verse sustituidos por elementos de líquido del interior de la fase. En los experimentos realizados se observó que todos los resultados de adsorción mostraban una correlación con la presión interfacial, independiente del tamaño y naturaleza química del tensioactivo que se empleara. Eso nos permite concluir que la presión interfacial es determinante para explicar la adsorción de gases en líquidos en movimiento con tensioactivo. El efecto hidrodinámico es decisivo.

la interfase es arbitraria; no obstante, la posición más conveniente es aquella que hace que el exceso de concentración interfacial de disolvente sea nulo.

En un sistema formado por un soluto y un disolvente, el exceso positivo de concentración interfacial de soluto indica que dicho componente se concentra en la interfase, es decir, se adsorbe en la interfase. Ahora bien, cuando en un sistema algún componente se adsorbe en la interfase la tensión interfacial disminuye, según se comprueba experimentalmente y se puede demostrar teóricamente desde principios de la termodinámica. A los componentes que se adsorben en gran cantidad en la interfase y provocan la consecuente caída de tensión interfacial se les denomina compuestos tensioactivos. Se trata de sustancias que, en general, contienen una cadena hidrocarbonada junto con un grupo polar o iónico. La parte hidrocarbonada, que puede ser lineal o ramificada, apenas interacciona con las moléculas de agua. Por otro lado, las moléculas de agua interaccionan fuertemente entre sí debido a las fuerzas de dispersión de London, las interacciones electrostáticas y los enlaces de hidrógeno. (Las fuerzas de dispersión de London, se llaman así en honor de Fritz Wolfgang London, dependen del potencial de ionización y de la polarización de los átomos de la molécula de agua.) En razón de ello, la parte hidrocarbonada del tensioactivo tiende a ser "marginada" y expulsada del agua (parte hidrófoba). En cambio, la parte polar o iónica del tensioactivo interacciona fuertemente con las moléculas de agua y, en consecuencia, tiende a quedar retenida dentro del medio acuoso (parte hidrofílica).

Así, pues, debido a su peculiar naturaleza, la mayor parte del tensioactivo añadido al líquido se concentra en la interfase con la parte hidrofílica orientada hacia la fase acuosa y la parte hidrófoba orientada hacia la otra fase, disminuyendo notablemente la tensión interfacial. La relación entre la tensión interfacial, la concentración de tensioactivo en el seno de la fase acuosa y el exceso de concentración interfacial del tensioactivo viene dada por una ecuación denominada isoterma de adsorción de Gibbs. Si crece la concentración de tensioactivo en la fase acuosa, aumentará consecuentemente la concentración de tensioactivo en la interfase, manteniéndose entre ambas un equilibrio dinámico. Cuando la interfase se encuentra ya saturada de tensioactivo y se sigue añadiendo tensioactivo al líquido, las moléculas de tensioactivo empiezan a asociarse entre sí, dentro de la fase acuosa, formando grandes paquetes moleculares o micelas. (La concentración de tensioactivo en la fase acuosa a la cual empiezan a formarse, en cantidad apreciable, dichas micelas se la conoce por concentración micelar crítica.) Las micelas se estructuran de forma tal que su envoltura externa presenta a la fase acuosa sólo la parte hidrofílica del tensioactivo; el interior de la micela, constituido por la agrupación de las cadenas hidrocarbonadas, tiene propiedades parecidas a las de un hidrocarburo líquido, y de ahí que en una fase acuosa con micelas puedan solubilizarse moléculas orgánicas normalmente insolubles en una fase acuosa sin micelas.



7. MENISCO DEL LIQUIDO adherido a la superficie de la placa de Wilhelmy, que se emplea para medir las tensiones superficiales. Por norma, la placa se construye en platino, porque se empapa fácilmente.

El comportamiento de las moléculas de tensioactivo adsorbidas en la interfase es análogo al comportamiento de las moléculas de un gas en un espacio bidimensional. Las moléculas de tensioactivo en la interfase ejercen una presión interfacial, π (pi), que aumenta con el exceso de concentración interfacial del tensioactivo, ρ (rho), y con la temperatura, *T*. Para el caso ideal en que el tamaño molecular es muy pequeño, comparado con la distancia media entre moléculas, y la interacción intermolecular es despreciable, se cumple $\pi = k\rho T$, ecuación equivalente a la de los gases perfectos. Esta ecuación ideal sólo se cumple para excesos de concentración interfacial muy bajos.

Para concentraciones interfaciales de tensioactivo más elevadas, la interacción molecular deja de ser despreciable. En razón de esas fuerzas intermoleculares, la presión interfacial no aumenta tan rápidamente con la concentración de tensioactivo en la interfase debido a la atracción mutua de las cadenas hidrocarbonadas del tensioactivo; en cambio, la repulsión electrostática de los grupos iónicos del tensioactivo promueven el efecto contrario; el efecto neto dependerá, en cada caso, del tipo de tensioactivo empleado. Desde un punto de vista mecánico, la presión interfacial hace que sea más fácil extender o expandir la interfase, con lo que la tensión interfacial de la disolución de tensioactivo, τ (tau), sea menor que la tensión interfacial del disolvente puro, τ_o:$\tau=\tau_o-\pi$

La disminución de la tensión interfacial de un líquido al añadirle tensioactivos provoca grandes modificaciones en los procesos de absorción y desorción de gases en líquidos en movimiento, y en otros procesos afines. Cuando una fase gas contiene una sustancia soluble y entra en contacto con el líquido, se produce una transferencia de dicha sustancia desde la fase gas hacia la fase líquida; decimos entonces que el gas se absorbe en el líquido; el proceso inverso o desorción acontece cuando la fase líquida, por ejemplo, está saturada con dicha sustancia, pero no lo está la fase gas; entonces, parte de dicha sustancia abandona el líquido y pasa a la fase gas. Ejemplos típicos de esos procesos los encontramos en la absorción y desorción de los gases atmosféricos en la hidrosfera, la depuración de las aguas residuales por oxigenación con aire y el tratamiento de gases en instalaciones industriales.

Para explicar el mecanismo de la absorción de un gas en un líquido en movimiento turbulento suele recurrirse a

la teoría de la renovación interfacial. Considera ésta que el gas se va difundiendo en los elementos del líquido que se hallan en contacto con la interfase; supone, asimismo, que esos elementos, concentrados con la sustancia que se está absorbiendo, se sustituyen continuamente, a un ritmo que depende de la intensidad de la turbulencia del líquido, por otros elementos de éste procedentes del interior de la fase, en donde la concentración de la sustancia que se absorbe es menor. En otras palabras, la absorción cursa a través de dos etapas: una etapa de difusión molecular en la región próxima a la interfase y una etapa de transporte turbulento en el interior del líquido.

Muestra la experimentación que la cantidad de gas absorbida por un líquido en movimiento llega a disminuir hasta en un 40 por ciento si en el líquido se introducen pequeñas cantidades de tensioactivo. Ese comportamiento obedece, se supone, a dos motivos. El primero es el denominado efecto de barrera del tensioactivo, en virtud del cual la elevada concentración del tensioactivo en la interfase tapona, por así decir, el paso de las moléculas del gas hacia el interior del líquido. El segundo, denominado efecto hidrodinámico, consiste en la disminución de la renovación interfacial de los elementos de líquido en contacto con la interfase.

Según el efecto hidrodinámico, cuando un elemento de líquido en contacto con la interfase se sustituye por un elemento de líquido del interior de la fase, se produce localmente, en la interfase, un aumento de la tensión interfacial: el elemento de líquido recién llegado a la interfase no ha tenido tiempo todavía de adsorber tensioactivo en la interfase y, por consiguiente, su tensión interfacial es casi igual a la del líquido libre de tensioactivo. Un aumento local de la tensión interfacial implica un aumento global de la energía libre del sistema y, por tanto, un cambio desfavorable. Ello provoca que los elementos de líquido en contacto con la interfase con tensioactivo adsorbido sean muy estables y se resistan a su remplazamiento por elementos de líquido del interior de la fase, pues tal cosa implicaría un aumento de la energía libre. Así pues, la presencia de tensioactivo en la interfase reducirá la renovación interfacial y, en consecuencia, disminuirá la absorción del gas.

Se han expresado muchas opiniones contrapuestas en torno a la importancia relativa entre el efecto de barrera y el efecto hidrodinámico. Con el objeto de poder cuantificar, por separado, esos dos efectos, hemos realizado en nuestro laboratorio de la Universidad de Barcelona una serie de experimentos de absorción de dióxido de carbono en agua sin tensioactivo y con éste. Todos los tensioactivos ensayados pertenecen al grupo mayoritario de los empleados en la fabricación de detergentes; los resultados obtenidos son generalizables al caso de la absorción de gases en aguas contaminadas con detergentes.

Conviene tener presente que el efecto de barrera depende del tamaño y de la naturaleza de la molécula de tensioactivo adsorbida en la interfase; cuanto mayor sea el tamaño de la molécula de tensioactivo, más importante será su efecto de barrera. Por contra, el efecto hidrodinámico depende sólo de la presión interfacial, pues ésta mide el aumento de energía libre que se opone a la renovación interfacial.

En nuestros ensayos, para detectar el efecto de barrera, recurrimos a tensioactivos de distintos tamaños moleculares y naturaleza química. En lo concerniente al tamaño molecular, utilizamos tensioactivos de cadena hidrocarbonada más o menos larga y tensioactivos lineales o ramificados, todos ellos con el mismo grupo hidrofílico; en lo relativo a la naturaleza química de los tensioactivos se emplearon prototipos con el grupo hidrofílico portador de carga eléctrica negativa (tensioactivos aniónicos) y tensioactivos con el grupo hidrofílico dotado de carga eléctrica positiva (tensioactivos catiónicos).

Se hizo descender agua con tensioactivo en condiciones turbulentas sobre un soporte sólido inerte, mientras que simultáneamente se hacía ascender el gas en contracorriente. Se repetía luego el ensayo sin tensioactivo. El análisis químico del líquido que abandonaba el sistema nos permitía conocer las cantidades totales de gas adsorbido. Para cada tipo de experimento, se determinó el efecto del tensioactivo dividiendo la cantidad de dióxido de carbono adsorbida en una unidad de tiempo por la cantidad adsorbida en las mismas condiciones cuando el líquido no contenía tensioactivo. Obteníase, así, el valor 1 para el agua pura y valores inferiores a 1 para los ensayos con tensioactivos. En todos los casos, dentro de un amplio margen de caudales de líquido, los resultados experimentales ofrecían una correlación directa con la presión interfacial, con independencia del tamaño o naturaleza del tensioactivo usado. Dicho de otro modo: todos los tensioactivos ensayados producían un mismo efecto con tal de que la presión interfacial que provocaban fuera la misma. Obviamente, para alcanzar idéntica presión interfacial cada tensioactivo necesita una concentración distinta que tiene que ver con su mayor o menor actividad como tensioactivo.

De estos resultados se desprende que el efecto hidrodinámico es, con mucho, el efecto determinante y, por tanto, es la presión interfacial del tensioactivo la causante de la disminución de la adsorción de gases en líquidos turbulentos. Importa resaltar que basta una concentración bajísima de tensioactivo para producir una caída drástica de la adsorción.

Cuando el líquido se mantiene estático o fluye en condiciones no turbulentas, no se produce el efecto hidrodinámico.En esas situaciones sólo interviene el efecto de barrera. Aunque la magnitud absoluta del efecto de barrera es escasa, sí resulta, no obstante, detectable. En este sentido, se ha experimentado en la aplicación de agentes de superficie para la reducción de la evaporación de agua estancada en grandes superficies de zonas áridas utilizando dicho efecto de barrera. Los resultados muestran una apreciable reducción de la evaporación, atribuible al efecto de barrera y, en buena parte también, a la supresión de las ondulaciones superficiales del líquido provocada por el agente de superficie.

El interés que despierta el estudio de las propiedades interfaciales responde, en parte, a la transferencia de materia, de energía y de cantidad de movimiento entre dos fases, que, necesariamente, se efectúa a través de una interfase. Por consiguiente, las propiedades de dicha interfase determinarán, en buena medida, los caudales transferidos. A lo largo del artículo hemos visto cómo la presión interfacial de un líquido, por pequeñas que sean las cantidades de tensioactivo introducidas, desempeñan un papel decisivo en la hidrodinámica interfacial, y ésta, a su vez, repercute sobre la transferencia entre la fase líquida y la fase gas.

En la biología y campos afines reviste una importancia especial la comunicación o transferencia de materia y energía entre los sistemas. Ni que decir tiene, la complejidad de la mayoría de las interfases que intervienen en los sistemas biológicos es superior a la mera interfase gas-líquido con tensioactivo aquí descrita. Ello no obstante, muchas veces los principios que se deducen de estos sistemas más sencillos sirven de punto de partida para abordar los sistemas más complejos, ya que el comportamiento se apoya en las mismas leyes fundamentales.

Juegos de ordenador

Belleza y profundidad: el conjunto de Mandelbrot y una hueste de primos suyos, de apellido Julia

A. K. Dewdney

Desde su primera aparición en estas páginas, en octubre de 1985, el conjunto de Mandelbrot se ha elevado por el firmamento de las matemáticas recreativas, hasta convertirse en la más nueva y rutilante de sus estrellas. Se trata de un conjunto a un tiempo hermoso y profundo. En realidad, la belleza del conjunto de Mandelbrot viene a constituir un velo, que enturbia su enorme importancia. El observador superficial ve en las proximidades de la frontera de ese conjunto una tumultuosa proliferación de filamentos y volutas, sin sospechar que codifican las múltiples formas del caos y el orden [*véase la figura 2*].

Mucho quedó por decir sobre ese conjunto en nuestra primera incursión de 1985. Posee una importante conexión con la estabilidad y el caos de los sistemas dinámicos, establecida a través de ciertos conjuntos íntimamente emparentados con él, conocidos por conjuntos de Julia, en honor del matemático francés Gaston Julia. Cada punto del interior (o del exterior) del conjunto de Mandelbrot tiene asociado un conjunto de Julia. Los conjuntos de Julia poseen una belleza fractal intrínseca y propia [*véase la figura 3*]. Antes de volver hacia ellos nuestra atención convendrá repasar el conjunto que toma su nombre de Benoit B. Mandelbrot, matemático del Centro de Investigación Thomas J. Watson que la Corporación IBM tiene en Yorktown Heights, Nueva York.

El conjunto de Mandelbrot tiene su morada en el plano complejo, que es un plano ordinario al que se han adscrito ciertos números. Con mayor precisión, cada punto del plano complejo está representado mediante un número complejo, cuya forma es $a + bi$. No molestará imaginar que a y b son las coordenadas del punto. La primera de ambas, la abscisa a, se llama "parte real" del complejo, mientras que la segunda, la ordenada b, se denomina "parte imaginaria". La i actúa en cierto modo con carácter de indicador, para recordar al lector qué parte es cada cual. Los números complejos se suman sin más que hacerlo con cada una de sus coordenadas. Al proceder así se obtiene de nuevo un número complejo. La multiplicación de los números complejos obedece a las mismas reglas de multiplicación que las expresiones algebraicas:

$$\begin{array}{r}3 + 7i \\ \times\, 2 - 4i \\ \hline 6 + 14i \\ -12i - 28i^2 \\ \hline 6 + 2i - 28i^2\end{array}$$

Para que el resultado vuelva a ser un número complejo es preciso reducir el término $28i^2$ haciendo uso de la más importante de las propiedades de los números imaginarios, a saber, que $i^2 = -1$. De esta forma, $6 + 2i - 28i^2$ se convierte en $34 + 2i$. Podemos ya presentar la fórmula clave, que abre la puerta que da al conjunto de Mandelbrot, trae consigo los conjuntos de Julia y, de una forma peculiar, pone orden en el caos:

$$z \leftarrow z^2 + c$$

En esta correspondencia, z y c son números complejos, compuestos cada uno por una parte real y una imaginaria. Por medio de la multiplicación y adición de números complejos, respectivamente, se eleva al cuadrado z y se le suma la constante c. La fórmula cobra vida al iterarla, esto es, al aplicarla repetidamente utilizando cada vez el valor recién obtenido de z para calcular el siguiente. La correspondiente sucesión de números complejos queda plasmada en un extraño vaivén sobre el plano complejo. En cada iteración, el número complejo recién obtenido se encuentra a cierta distancia de su predecesor. En el proceso de cómputo del conjunto de Mandelbrot, la distancia desempeña un papel crítico.

Me gusta imaginar que la sucesión de números complejos (o lo que es igual, de puntos del plano complejo) generada a partir de la fórmula corresponde al vagabundeo de un punto inicial. ¿Añora tal punto la infinitud, ansía bailar por el plano complejo alejándose cada vez más hacia el exterior? No son pocos los puntos del plano complejo que gozan de tal destino. Otros, en cambio, están confinados en una cierta región, de forma extremadamente complicada. Diríase que se hallan presos. Su prisión, la región de su confinamiento, tiene muros fractales.

En la descripción anterior he dado por supuesto que el proceso iterativo se repite una y otra vez. ¿Cómo debe procederse entonces para seleccionar c y el valor inicial de z? Una solución es tomar siempre z igual a 0 y seleccionar diferentes valores de c. ¿Llegará a escapar el preso? El experimento se repite una y otra vez, haciendo variar sistemáticamente a c sobre una región del plano complejo. Si el preso escapa, el punto c se pinta de blanco; de no ser así, se pinta de negro. Los muros de la prisión cobran la forma de un conjunto de Mandelbrot. Si en lugar de pintar de blanco los fugados se les asignan diversos colores, de acuerdo con su velocidad de escape, surgen imágenes más bellas incluso.

Sometido a la regla recién descrita, z comenzó con el valor complejo 0, esto es, $0 + 0i$. ¿Qué sucedería si se partiera de otro valor inicial fijo, por ejemplo, $3{,}5 + 6i$? ¿Tendría el conjunto resultante una forma diferente? En realidad, el resultado es siempre una versión deformada del conjunto de Mandelbrot. Prefiero el objeto canónico.

Aplicando la regla contraria, en la que c es fijo y z desempeña el papel de punto inicial, el aspecto del conjunto resultante se aparta bastante del de Mandelbrot. Se le denomina, o mejor a su frontera, conjunto de Julia. Me hubiera gustado llamarle "el" conjunto de Julia, pero es que son legión: para cada valor fijo de c utilizado en la fórmula de iteración aparece un conjunto de Julia nuevo y diferente, repleto de prisioneros.

Lo que me inspiró el retorno al conjunto de Mandelbrot fue *The Beauty of Fractals*, libro de gran formato cuyos autores son Heinz-Otto Peitgen y Peter H. Richter, de la Universidad de Bremen [véase "Bibliografía", al final de este número]. Por sus asombrosas ilustraciones, tanto en blanco y negro como en color, el libro vale por igual como ornato de la mesa de café que como texto de matemáticas. Todos nuestros conocimentos sobre el conjunto de Mandelbrot, sus conjuntos de Julia asociados y otros sistemas complejos se encuentran cristalizados en teoremas y, de vez en cuando, se exponen en párrafos de fácil lectura.

Permítaseme describir el efecto de uno de los teoremas. Los lectores que redacten programas para mostrar conjuntos de Julia quizás observen que, para ciertos valores de c, los conjuntos son evidentemente conexos, esto es, de una sola pieza; en cambio, para otros valores de c, los conjuntos no son conexos. ¿Cuál es la causa de tal diferencia? La respuesta es a un tiempo sencilla y encantadora: si el punto c se elige en el interior del conjunto de Mandelbrot, el correspondiente conjunto de Julia es conexo. Si, por el contrario, se selecciona c en el exterior del conjunto de Mandelbrot, el conjunto de Julia asociado a c no es conexo.

Podría realizarse una película fascinante que ilustrase el teorema al caso. Trácese una línea recta L desde un punto arbitrario del interior del conjunto de Mandelbrot hasta otro punto yacente en su exterior, e imagínese que un punto c va desplazándose lenta y regularmente a lo largo de L, partiendo del interior del conjunto de Mandelbrot y encaminándose hacia su frontera. El conjunto de Julia asociado va cobrando progresivamente aspecto cada vez más estrujado y deforme, hasta que, al alcanzar c la frontera del conjunto de Mandelbrot, se contrae y reseca en un esqueleto frágil, dendrítico, que no encierra en sí área ninguna. En cuanto c rebasa la frontera, el correspondiente conjunto de Julia hace explosión y se fragmenta en polvo fractal.

Los lectores que sepan y quieran preparar el programa adecuado podrán explorar el conjunto de Mandelbrot y los conjuntos de Julia plasmando ciertos algoritmos en el lenguaje que prefieran. Los algoritmos comparten todos ellos el proceso iterativo que es alma del procedimiento, que depende fuertemente del siguiente teorema: si el tamaño (o módulo, como se le llama en matemáticas) de la iteración z alcanza el valor 2, la iteración está destinada a escapar hacia el infinito y no regresar jamás. El teorema permite distinguir casi todos los evadidos de los presos. El algoritmo concede a z un máximo de 100 iteraciones para que llegue a 2. Dado que existe un número relativamente pequeño de posibles evadidos que no logran alcanzar la magnitud 2 en 100 iteraciones, el discriminante no es exacto al 100 por ciento. Evidentemente, se podrían conceder 1000 iteraciones, obteniéndose una imagen un poco más precisa, pero tal proceder resulta muy lento.

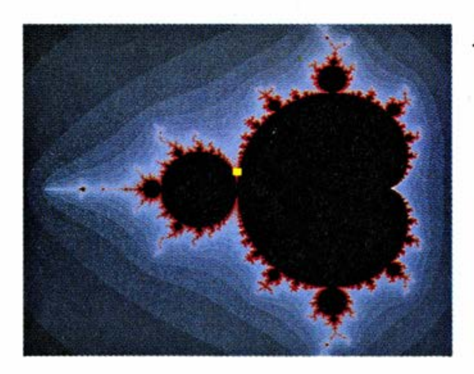
La magnitud (valor absoluto, o módulo) de un número complejo $a + bi$ es sencillamente la raíz cuadrada de $a^2 + b^2$, esto es, la distancia que lo separa del complejo 0. Damos a continuación el algoritmo núcleo:

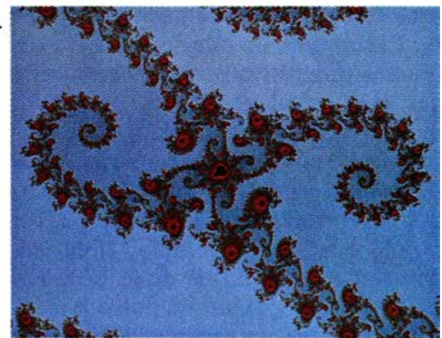
$n \leftarrow 0$
mientras $n < 100$ y $mag(z) < 2$
  $z \leftarrow z^2 + c$
  $n \leftarrow n + 1$
colorear el punto estudiado

Tenemos aquí un contador n que asoma a la vida con valor 0. En el bucle



1. Versión lacustre del conjunto de Mandelbrot. Las montañas reflejan la dinámica de los puntos que lo rodean





2. *Conjunto de Mandelbrot* (**izquierda**) *y una de sus porciones* (**cuadrado amarillo**) *ampliada a la derecha*

"mientras" que controla el proceso de iteración, el contador n se incrementa en una unidad por cada iteración. El bucle "mientras" prosigue dando vueltas al manubrio de la fórmula fundamental en tanto n no alcance el valor 100 y la magnitud de z se mantenga por debajo de 2. En cuanto deje de cumplirse alguna de las dos condiciones, el algoritmo sale del bucle. La asignación de colores queda al cuidado del lector. Evidentemente, el color utilizado habrá de ser alguna función sencilla de n, que mide la lentitud con que z escapó o fracasó en su intento de evasión. El lector debe tener igualmente presente que el punto a dibujar ha de venir dado por un par de coordenadas de pantalla, que serán ciertamente diferentes de las coordenadas del número complejo que se represente allí.

El programa del lector habrá de contener una sección independiente destinada al cómputo de la magnitud de z, denotada *mag*(z) en el algoritmo precedente. En realidad, dado que casi ningún lenguaje de programación dispone de instrucciones para el manejo directo de números complejos, será preciso conservar z en dos partes, a las que podemos llamar x (la parte real) e y (la parte imaginaria); el valor c puede recibir idéntico tratamiento y expresarse, por ejemplo, a y b. El siguiente algoritmo ya se aproximaría más a un programa susceptible de ejecución:

$n \leftarrow 0$
mientras $n < 100$ y $x^2 + y^2 < 4$
    $xx \leftarrow x^2 - y^2 + a$
    $y \leftarrow 2xy + b$
    $x \leftarrow xx$
    $n \leftarrow n + 1$
coloréese el punto estudiado

El astuto lector se habrá percatado de un pequeño truco introducido en esta variante del proceso fundamental: en lugar de comparar la raíz cuadrada de la cantidad $x^2 + y^2$ con 2, el algoritmo compara directamente esa cantidad con 4. Aunque el resultado es el mismo, se evita así la continua invocación de la función raíz cuadrada, que es de ejecución lenta. La variable xx alberga el valor de x en tanto se obtiene el nuevo valor de y. De ese modo, el valor viejo de x queda a salvo para el cálculo de la nueva y. Finalmente, se asigna a x el valor provisionalmente guardado en xx.

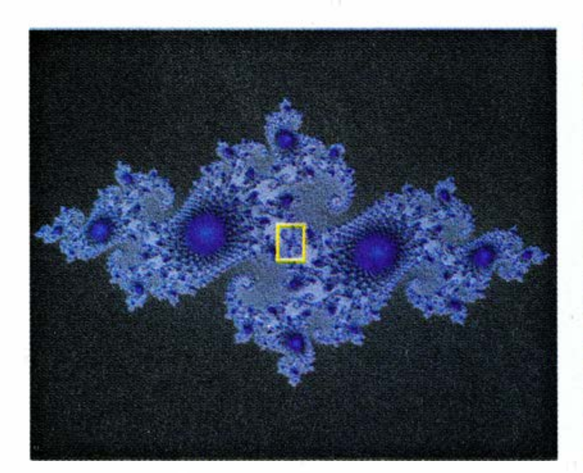
Aparece aquí de nuevo el programa que llamé MANDELZOOM en mi primera incursión de hace dos años largos, pero en forma algo más detallada. El algoritmo básico queda arropado en el interior de un bucle que, sistemáticamente, modifica el número complejo c, en lugar de sus partes real e imaginaria. Si la imagen ha de tener (pongamos por caso) 100 por 100 pixeles (elementos de imagen), debería disponerse el siguiente bucle doble:

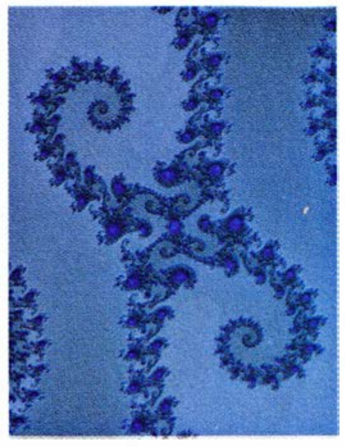
vano $\leftarrow$ *lado*/100
$a \leftarrow$ *avértice*
desde $j \leftarrow 1$ hasta 100
    $a \leftarrow a$ + vano
    $b \leftarrow$ *bvértice*
    desde $k \leftarrow 1$ hasta 100
        $b \leftarrow b$ + *vano*
        $x \leftarrow 0$
        $y \leftarrow 0$
        [algoritmo fundamental]

Antes de atacar este grupo de instrucciones, MANDELZOOM permite al usuario del programa introducir el número complejo que ha de aposentarse en uno de los vértices del cuadrado que interese. Tal punto tiene las coordenadas *avértice* y *bvértice*, que son los valores mínimos que tomarán a y b en el cuadrado. Este cuadrado, cuya especificación también corre a cargo del usuario, da a MANDELZOOM su nombre. Viene a ser una ventana a través de la cual podamos curiosear. Podemos hacerla muy, muy pequeña, lo que tendría por efecto la ampliación a toda pantalla de la porción microscópica del conjunto sobre la que hayamos abierto nuestra ventana. MANDELZOOM tiene, pues, que pedir al usuario que le dé un valor para el lado, la anchura que tendrá la imagen sobre el plano complejo. El algoritmo calcula entonces el vano de separación que media entre números complejos sucesivos c, y procede en consecuencia a dar a a y b los incrementos adecuados.

Los valores de los índices j y k no intervienen en ninguno de los cálculos que figuran en el bucle doble, por lo que se dispone de libertad para modificarlos y darles forma más útil. Por ejemplo, en lugar de hacer que j y k recorran los valores de 1 a 100, podrían recorrer cada uno 100 valores consecutivos de coordenadas de pantalla. Cuando el algoritmo básico ha decidido qué color debe asignarse a la iteración de z, se colorea de ese tono la cuadrícula de coordenadas (j,k).

No puedo dejar MANDELZOOM sin mencionar una modificación sugerida por Peitgen. En lugar de comparar con 2 la magnitud de la iteración z, hágase con 100 o incluso con 1000. Después de todo, cuando la magnitud rebasa el valor 2, aumenta muy rápidamente, y al-





3. *Conjunto de Julia* (**izquierda**) *correspondiente al centro de la figura superior derecha, y ampliación* (**derecha**)

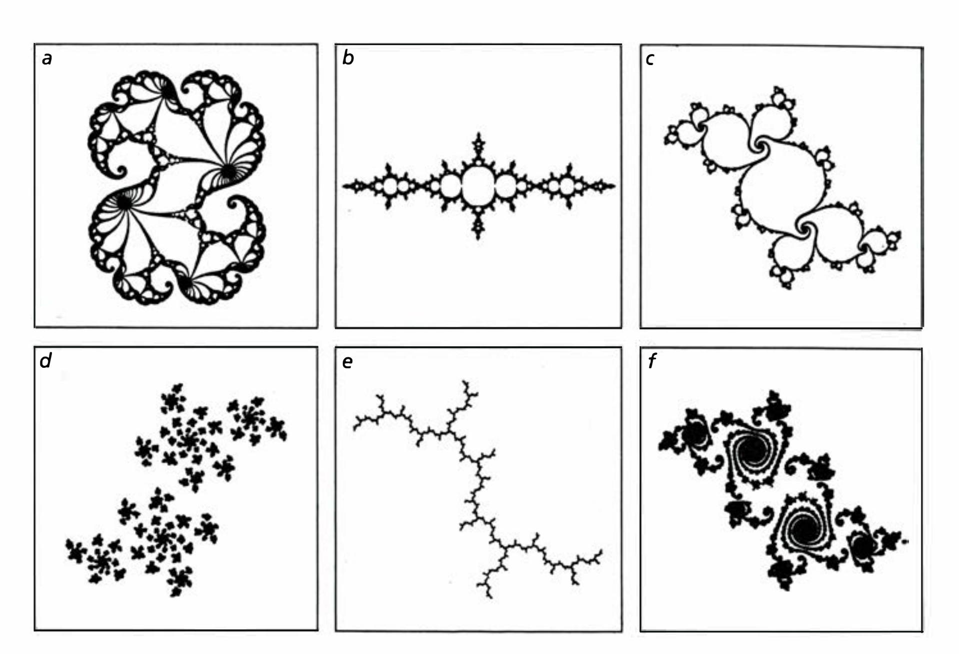
canza los valores mencionados en unas pocas iteraciones más. Sin embargo, las diversas iteraciones rebasan tal valor umbral con muy distintas velocidades. Es posible colorear las velocidades ¡y hacerlo de modo continuo! Por ejemplo, disponiéndose de una paleta de colores suficientemente refinada, podría hacerse que el rojo evolucionara a naranja. En cualquier caso, las imágenes en color que ilustran este artículo se obtuvieron por esa técnica. Peitgen asocia esas velocidades a intensidades de un campo electróstatico que rodease el conjunto de Mandelbrot. Las "intensidades" de campo están representadas en el imaginario paisaje de Mandelbrot [*véase la figura 1*] como pendientes de una escarpada sierra que rodease un lago, al que no es posible bautizar sino lago Mandelbrot.

No es que me haya enamorado del nombre, pero compelido como estoy por notaciones anteriores, he de bautizar JULIAZOOM al programa que engendra imágenes de los conjuntos de Julia. También aquí podemos acercarnos en picado al nivel microscópico y examinarlo con gran amplificación. El núcleo del algoritmo de JULIAZOOM es el mismo que el de MANDELZOOM, si bien la corteza que lo envuelve es de clase algo diferente.

JULIAZOOM empieza solicitando al usuario los datos *xvértice*, *yvértice* y *lado*. Le pide también un valor de c expresado mediante dos variables, a y b. Se vale seguidamente del mismo bucle doble, si bien con algunas diferencias importantes:

```
vano ← lado/100
x ← xvértice
desde j ← 1 hasta 100
    x ← x + vano
    y ← yvértice
    desde k ← 1 hasta 100
        y ← y + vano
        [algoritmo básico]
```

El algoritmo básico colorea los puntos de la pantalla según la lentitud con que las iteraciones alcancen (o dejen de alcanzar) el umbral mágico de la magnitud 2. Algunos de los gráficos más efectivos se obtienen al asignar a las variables los valores más sencillos. En el caso de monitores en color, pueden obtenerse resultados muy llamativos con solo tres colores y ajustándose al siguiente esquema: asígnese el primer color a los puntos cuyo valor de lentitud (n) se encuentre entre 0 y 10, el segundo color a los puntos de lentitudes comprendidas entre 11 y 20 y, el tercer color, a lentitudes de 21 a 30. Se vuelve entonces al primer color en la década



*4. Seis conjuntos de Julia, conexos algunos (***a, b, c** *y* **e***) y otros no (***d** *y* **f***)*

siguiente, y así sucesivamente. Los monitores monocromáticos permiten también preciosos efectos en blanco y negro (o en verde y ámbar) alternando a décadas esos dos tonos.

Equipados de una versión de MANDELZOOM O JULIAZOOM (y por qué no de ambos) debidamente adaptada a sus máquinas, los lectores podrán explorar por sí mismos esos magníficos e importantes conjuntos fractales. Puede uno recorrer el plano complejo por la vecindad de los conjuntos, o examinar con gran detalle partes concretas merced al microscopio computarizado que hemos facilitado arriba. Cada uno de los conjuntos revela detalles asombrosos, hasta los límites de resolución que imponga la precisión aritmética de nuestra máquina. Para orientación de los viajeros que penetren por vez primera en el mundo infinitesimal de las fractales, los siguientes intervalos de coordenadas encierran por los cuatro lados ambos tipos de conjuntos.

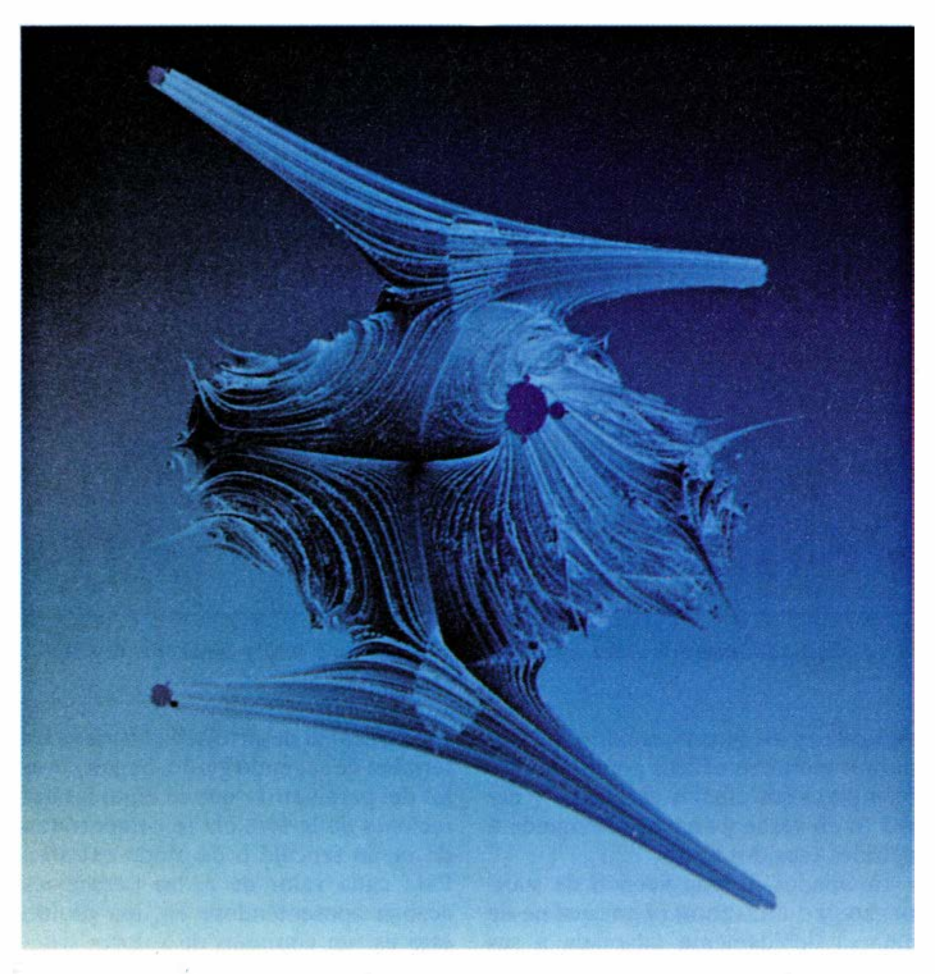
conjuntos de Julia:
  x e y desde $-1{,}8$ hasta $+1{,}8$;
conjunto de Mandelbrot:
  x desde $-2{,}25$ hasta $+0{,}75$,
  y desde $-1{,}8$ hasta $+1{,}5$

El pasado mes de septiembre toqué el problema del caos en sistemas dinámicos, como péndulos y circuitos electrónicos. Una sencilla fórmula iterativa, en la que no intervenían números complejos sino números reales, resumía la actividad de tales sistemas:

$$x \leftarrow rx(1 - x)$$

La fórmula es a todas luces una función cuadrática: al desarrollarla contiene un término de segundo grado. Según el valor del parámetro r que se elija, las iteraciones de la fórmula se comportarán de modo sencillo o de modo extraño. Para cada valor de r, las iteraciones acaban aposentándose en una órbita, esto es, un conjunto de valores sistemáticamente visitados por la x. Para un valor crítico situado en el entorno de 3,5699, las iteraciones oscilan de forma incontrolada y más o menos impredecible entre una serie de valores. La situación corresponde a la de un sistema subyacente, sea un péndulo doble o un circuito electrónico, que llega a bloquearse por completo en su búsqueda de la estabilidad. El sistema se pone a oscilar incontroladamente, de formas no vislumbrables por anticipado. Caos.

Se presenta un fenómeno similar con la fórmula de iteración compleja $z \leftarrow z^2 + c$ descrita aquí. Ahora, sin embargo, para un valor dado de c aparece más de una órbita atractiva, que depende de cómo se elija el valor inicial de z. Si z tiene una magnitud inicial relativamente pequeña, gravitará hacia un punto específico. Si el valor es grande, se hará ilimitadamente más grande: el atractor es el infinito. El punto concreto y el propio infinito constituyen dos órbitas atractivas unipuntuales para los puntos del plano complejo. La frontera entre sus dominios de atracción, que es precisamente el conjunto de Julia, es increíblemente arrugado y reseco. Es también una órbita, pero no es órbita atractiva en sentido técnico. En su interior, los puntos que ya se encuentran en la frontera saltan caóticamente de un lado a otro. Sin embargo, el cómputo directo del conjunto de Ju-



5. *Sección transversal tridimensional del conjunto de Mandelbrot*

lia no resulta fácil, pues, para empezar, la precisión numérica del ordenador puede no permitirnos especificar puntos situados exactamente en la frontera; a los efectos de la iteración, la precisión se degrada y el valor iterado se pierde en la noche.

Como ya he señalado anteriormente, cada posible valor de *c* fructifica en un nuevo y diferente conjunto de Julia. En cierto sentido, el conjunto de Mandelbrot resume, de una sola pasada, la totalidad de los posibles conjuntos de Julia. Describe la suerte de las iteraciones del 0 complejo para todos los valores posibles de *c*. Para ciertos conjuntos de Julia, la región caótica es una mera figura arborescente, o incluso una especie de simétrico espolvoreo de pimienta. Los lectores recordarán que tales conjuntos de Julia corresponden a valores de *c* situados sobre la frontera del conjunto de Mandelbrot, o más allá.

Tuve ocasión de reunirme con Peitgen en una conferencia celebrada recientemente en Asilomar, California. Mientras paseábamos por la playa, entre sesión y sesión, Peitgen me describió el conjunto de Mandelbrot como una especie de libro inmenso, en el cual cada conjunto de Julia fuera una página. A partir de la posición de *c* en el conjunto de Mandelbrot se puede predecir la conducta genérica de las iteraciones, es decir, la forma general y el tamaño del conjunto de Julia asociado. No se trata solamente de establecer si el conjunto es o no conexo. Por ejemplo, si el valor de *c* se toma en el cuello que conecta el cuerpo principal del conjunto de Mandelbrot y uno de sus cogollos, el correspondiente conjunto de Julia resulta estar estrangulado en cuellos y cogollos propios. La analogía del conjunto de Mandelbrot como una especie de diccionario para los conjuntos de Julia comporta una diferencia fundamental entre ambos. El conjunto de Julia es semejante a sí mismo, pero el de Mandelbrot no lo es (ni siquiera lo es su frontera). Si lo fuera, no tendría capacidad para portar, codificada, la colección infinita y no numerable de parientes apellidados Julia.

Hay en *The Beauty of Fractals* mucho más que lo expuesto. Estoy sumamente reconocido a Peitgen por haberme facilitado las imágenes que ilustran este artículo. No todas ellas se han generado por los procedimientos que he descrito, pero en el libro se dan las recetas correspondientes.

A modo de nota final sobre las investigaciones sobre sistemas dinámicos hoy en curso, mencionaré un objeto más que acecha desde el espacio de dimensión mayor que tres: un objeto monstruoso resultante de iteraciones cúbicas, con z^3 en lugar de z^2 en las fórmulas de iteración. El objeto es tetradimensional y está provisto de zarcillos que se curvan en direcciones inconcebibles. No obstante, las secciones transversales tridimensionales sí son computables. Una de ellas se recoge en la figura 5.

El artículo de agosto sobre algoblemas sigue generando correspondencia desde todas partes del mundo. Tras tocar el tema el mes pasado, vuelvo a él en éste, como prometí. Antes de adentrarnos en el desierto para revelar las soluciones de los dos últimos problemas propuestos en el artículo de junio, he de corregirme a mí mismo en lo tocante a trenes. Manuel Blum, un informático de la Universidad de California en Berkeley, ha señalado que el trabajo requerido para que un tren rebase al otro mediante el algoritmo dado es en realidad proporcional a n^3 (y no a n^2), siendo *n* el número de vagones que forman el tren. A *grosso modo*, cada uno de los *n* coches se trasladó *n* veces a lo largo de una distancia de *n* unidades. Blum ha encontrado un algoritmo que realiza la misma tarea con trabajo total proporcional a $n^2 \times \log n$. Desdichadamente, no disponemos de espacio para dar el algoritmo.

El primero de los problemas del Zorro del Desierto trataba de un vehículo todoterreno que podía cargar cada vez con un bidón de 200 litros de combustible, así como con 40 litros de combustible en el depósito. Demostré el mes pasado que, partiendo de un almacén que disponía de dos barriles, el vehículo podía recorrer un máximo de 1466,66 kilómetros antes de agotar el combustible.

La fórmula general enviada por Lawrence Leinweber, de Cleveland, Ohio, tipifica las que proporcionaron las máximas distancias (cuya exactitud no puedo garantizar):

$$5 \sum_{i=1}^{n} \frac{100}{2i-1} - \frac{100}{2n-1} + 100$$

La letra griega Σ denota la suma. Se forman *n* sumandos asignando a *i* los valores consecutivos de 1 a *n* en el cociente $100/(2i-1)$. Se suman los *n* términos y se multiplica por 5, obteniéndose el resultado expresado en millas.

En el segundo de los problemas del Zorro del Desierto, un vehículo de patrulla reposta de *n* depósitos de com-

bustible repartidos por puntos arbitrarios del circuito que ha de seguir el coche. La cantidad de combustible de cada depósito es también arbitraria; la única condición es que el combustible total así repartido sea suficiente para que el coche complete el circuito, hazaña que logrará si no parte de un depósito indebido. El tanque de combustible del vehículo puede contener la cantidad que se quiera, pero inicialmente está vacío. ¿De dónde debe partir el vehículo?

Algunos lectores, entre quienes se cuenta Arnold V. Loveridge, de Long Beach, California, atinaron con una ingeniosa forma de visualizar el problema. Efectuemos un recorrido del circuito partiendo de uno cualquiera de los depósitos y circulando en un sentido cualquiera. Tracemos una gráfica que represente el combustible contenido en el tanque del todoterreno y sigamos avanzando "de prestado" aún después de haberlo agotado. En tales casos, la gráfica atraviesa el eje horizontal, indicando con ello que el tanque contiene una cantidad negativa. Cada vez que repostamos en uno de los depósitos de la ruta, la gráfica salta bruscamente hacia arriba y luego emprende otro largo y suave descenso. Al cabo, el auto retorna al punto de partida. El conductor debe ahora examinar la gráfica y seleccionar aquel de los depósitos de la ruta donde el tanque del vehículo contuviera menos combustible (antes de repostar). De ese depósito debe partir el auto.

Fueron muchas las personas dispuestas y decididas a explorar el caos programando la fórmula iterativa presentada en el artículo de octubre. Algunas de ellas, entre quienes se cuenta Howard Mark, de Suffern, Nueva York, se atuvieron a mi recomendación de seguir la pista al proceso iterativo tejiendo una especie de telaraña que va reflejándose sobre una parábola. En este caso, la convergencia del proceso queda manifiesta en que la telaraña, al entretejerse, tiende a adquirir forma estable. En cambio, en el estado caótico llenaba de blanco toda una región de la pantalla, por crearse una confusión de cuadrados que no se estabiliza en configuraciones distinguibles. Charles A. Plantz, de West Brownsville, Pennsylvania, se sirvió de su microordenador a modo de microscopio, centrando la mira sobre el arco en forma de estribo del diagrama de bifurcación, justamente en lo alto de una de las regiones caóticas. No encontró allí la mezcla de sal y pimienta que yo hubiera esperado, sino plegamientos y estratos que invaden la textura del caos.

Taller y laboratorio

En las células de Hele-Shaw pueden estudiarse interfases fluidas, incluidos los flujos fractales

Jearl Walker

La observación de una corriente fluida tridimensional es costosa, por la propia complejidad del movimiento y porque la vista del interior suele permanecer oculta. A finales del siglo pasado, el ingeniero inglés Henry S. Hele-Shaw ideó un procedimiento que facilitaba la visión de la corriente, gracias a su confinamiento en una capa delgada. La llamada célula de Hele-Shaw se compone de dos placas transparentes paralelas separadas por un pequeño intersticio. Unos separadores colocados entre ambas placas impiden que el fluido salga del interior. Con tal dispositivo, podemos observar y fotografiar un fluido encerrado en su interior o que fluya de un extremo a otro.

Durante medio siglo, este dispositivo no fue más que un medio muy práctico para observar fluidos. Pero, alrededor de 1956, Sir Geoffrey Taylor, físico británico célebre por sus investigaciones en física de fluidos, se dio cuenta de que la célula podría servir para ilustrar un importante problema de la industria petrolera. En ciertos yacimientos, el petróleo se encuentra aprisionado en un material poroso que imposibilita su bombeo directo, como en el caso de un pozo normal. Una solución consiste en inyectar agua a través del material y obligar así al petróleo a reunirse, formando un depósito del que pueda extraerse. Taylor contempló este problema bajo una perspectiva más amplia. ¿Cómo se comportan los fluidos cuando uno de ellos (como el agua), de baja viscosidad, empuja a otro (como el petróleo) de viscosidad mayor? En sus estudios, Taylor descubrió que la interfase entre ambos fluidos podía hacerse inestable y generar configuraciones onduladas.

Cuando se comprobó la naturaleza inestable de la interfase, la atención se volvió hacia el movimiento de los fluidos dentro de las células de Hele-Shaw. Ensayando con diversos fluidos, los investigadores descubrieron que tales interfases inestables adoptaban numerosas y sorprendentes formas. Las investigaciones realizadas durante los dos últimos años han revelado que, bajo ciertas circunstancias, las interfases desarrollan una apariencia fractal. El término fractal se emplea para expresar el fenómeno en virtud del cual la morfología de un relieve determinado se repite cuando se examina a otras ampliaciones. De tales configuraciones se dice que son autosemejantes. Aunque las configuraciones que se observan en las células de Hele-Shaw son fractales sólo dentro de ciertos límites de ampliación, han suscitado mucho interés para el estudio de interfases fluidas inestables.

Con el propósito de reproducir parte de esas investigaciones, construí una célula de Hele-Shaw sencilla. Si bien acostumbran a hacerse de vidrio plano, preferí emplear placas de plástico acrílico: se taladra con mayor facilidad y hay que abrir orificios en las paredes de la célula. Adquirí las placas cuadradas, de unos 40 cm de lado y unos 20 mm de espesor, en una tienda de materiales plásticos, por unas 5000 ptas. Servirían unas placas más finas (y más baratas), pero con un espesor inferior a 12 mm probablemente se combarían al montarlas en la célula.

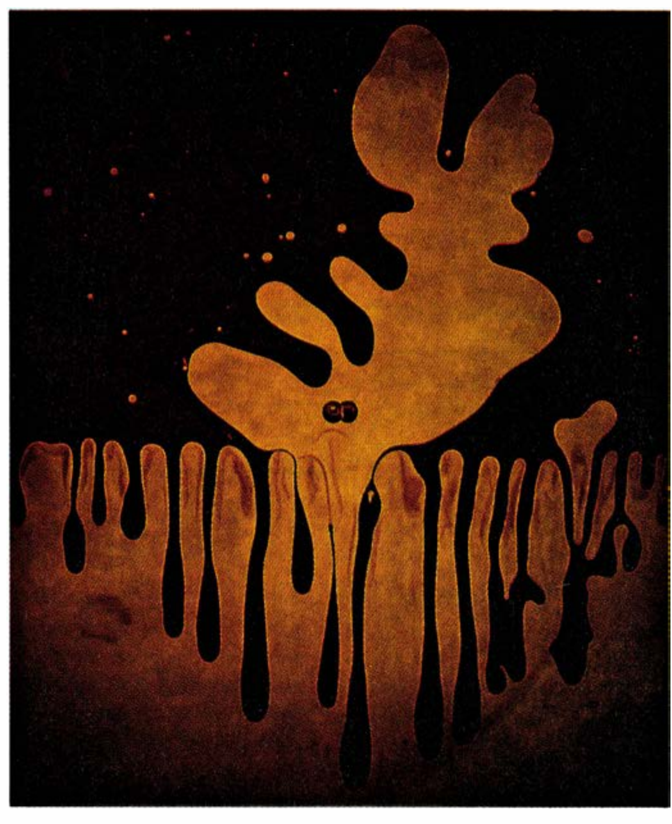
En algunos experimentos, necesitaba inyectar un fluido en el centro de la célula. Para acomodar la aguja de una jeringa, taladré la placa que habría de constituir la cara superior de la célula. El orificio abierto medía unos 3 mm de diámetro. Además, para facilitar la inyección, curvé la punta de una aguja de modo que ésta penetrara un poco por debajo de la placa y paralelamente a la misma.

Probé con espaciadores de varios tipos. Los mejores resultaron ser esas bandas estrechas y delgadas de caucho alveolar que se venden para impermeabilizar las ventanas. Elegí unas bandas de algo más de 6 mm de ancho. Tras cortarlas de modo que se adaptaran al perímetro de la placa inferior, las pegué con el lado engomado hacia abajo.

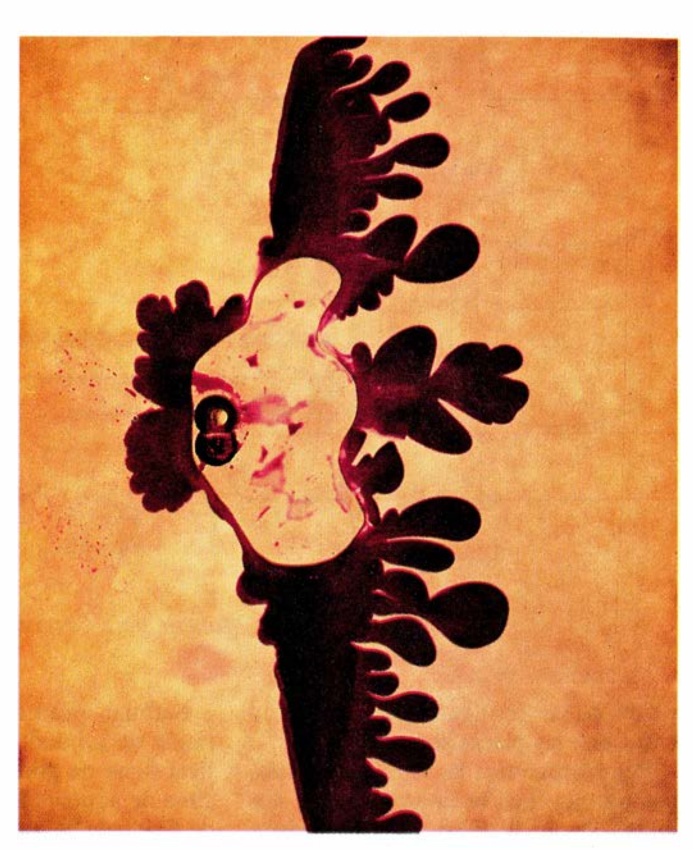
En la banda de caucho de uno de los cantos de la célula abrí varias ranuras por donde pudiera salir el fluido en caso de que, en algún experimento, hubiera que introducir más cantidad del mismo, estando la célula ya llena. Aseguraba las placas una con otra valiéndome de seis o más abrazaderas. Para preparar cada experimento, retiraba las abrazaderas y la placa de arriba y, seguidamente, vertía un líquido sobre la placa inferior. Cuando deseaba que la célula estuviera completamente llena durante el experimento, depositaba líquido suficiente para que quedara cubierta aproximadamente la mitad de la placa inferior. Luego, al añadir la placa superior y apretar una placa contra otra con las abrazaderas, el líquido llenaba toda la célula y el sobrante rezumaba por los orificios del separador.

Para evitar las burbujas, vertía el líquido sobre la mitad de la placa inferior más cercana a mí, para luego tender la placa superior con mucho cuidado, empezando por la parte de la célula contigua a mí. Pese a ello, seguían a veces apareciendo burbujas al apretar las abrazaderas. Para eliminarlas, taponaba el agujero central con una toalla de papel y luego ponía la célula de pie sobre un canto. Tras desplazarse hacia la parte superior, la mayoría de las burbujas reventaban al llegar a las aberturas del separador.

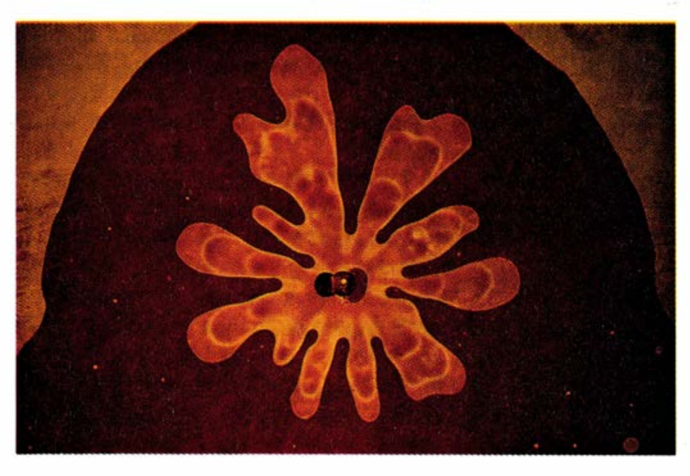
Con las abrazaderas completamente apretadas, había un milímetro escaso de separación entre las placas. La separación resulta crítica en algunas experiencias, pues de ella depende el tamaño de las configuraciones que adopta la interfase. Algunas de esas configuraciones dependen asimismo de la anchura de izquierda a derecha de la célula; si ésta es demasiado estrecha, pueden no aparecer. Lo que puede presentar algún problema en células caseras, si queremos que la célula sea lo bastante ancha para favorecer la apa-



1. Jarabe de chocolate escurriéndose en una célula de Hele-Shaw



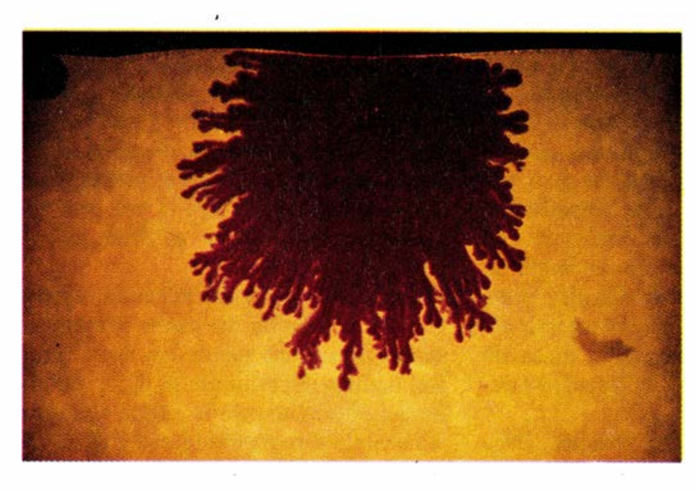
2. Figura generada con glicerina, aflojando una abrazadera



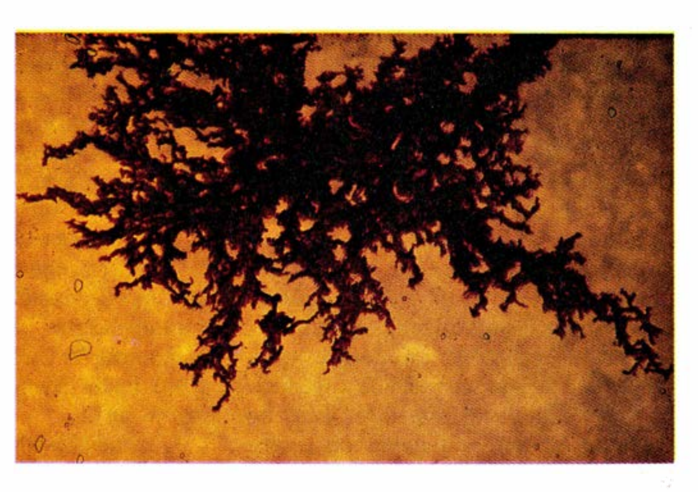
3. Aceite inyectado en jarabe de maíz opaco



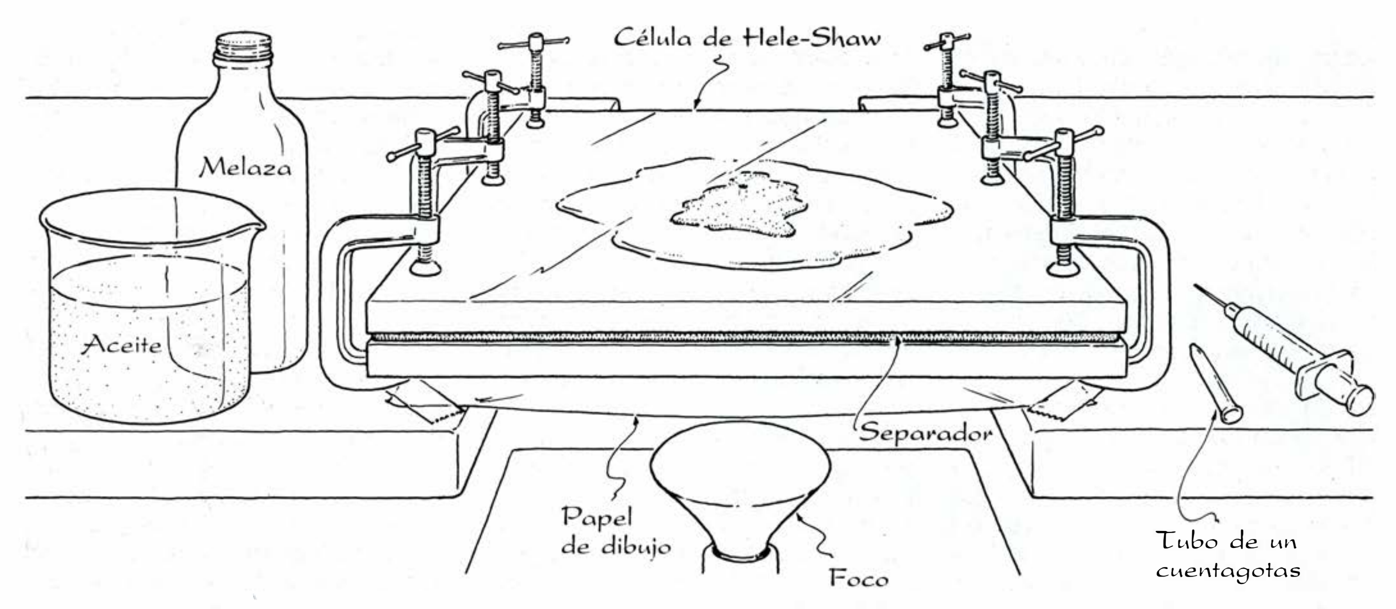
4. Agua teñida e inyectada en leche condensada



5. Celulosa muy concentrada



6. Agua teñida e inyectada en gelatina



7. Montaje para observar una célula de Hele-Shaw

rición de las configuraciones, pero no tanto que las placas se comben.

Para fotografiar las configuraciones, coloqué un foco boca arriba entre dos mesas de igual altura. De un lado a otro del espacio entre ambas mesas, sujeté con cinta adhesiva una hoja de papel de dibujo blanco, con la doble misión de difundir la luz y proteger la lámpara de las salpicaduras. Tras llenar una célula, la colocaba por encima del papel, haciéndola descansar con las abrazaderas apoyadas sobre las mesas.

Comencé estudiando unos experimentos relatados, en 1958, por Taylor y Philip G. Saffman, de la Universidad de Cambridge. Imaginemos una célula de Hele-Shaw llena, por un lado, de un fluido de baja viscosidad y, por el otro, de un fluido de alta viscosidad; entre ambos, se establece una interfase plana. Si el fluido de baja viscosidad se impulsa hacia el de alta viscosidad, de tal modo que la interfase se mueva lentamente, ésta permanece plana. Ahora bien, si la velocidad excede cierto valor crítico, la interfase, inestable, acabará por romper en formas onduladas que se acentúan con el tiempo. La interfase no tarda en adquirir la forma de guante, con unos dedos de fluido de baja viscosidad que se adentran en el de alta viscosidad. Esa inestabilidad y el crecimiento de los dedos tienen su origen en la diferencia entre las viscosidades de los dos fluidos. La tensión interfásica (o tensión superficial, si uno de los fluidos es el aire) se opone a la inestabilidad, puesto que tiende a reducir la superficie de la interfase. Ello no obstante, si ésta se mueve con celeridad, los dedos se forman y crecen.

Saffman puso de manifiesto la aparición de los dedos con una célula vertical llena de glicerina y aire, éste encima de aquélla. El aire hacía las veces de fluido de baja viscosidad. Cuando se impulsaba aire adicional a la parte superior de la célula, la glicerina se veía obligada a salir por el fondo. La velocidad de la interfase era lo bastante elevada para que en ella se generasen ondas, que se transformaban en dedos de aire que se extendían glicerina adentro. Para nuestra sorpresa, uno de los dedos se enseñoreaba de la configuración, mientras los otros dejaban de crecer. La anchura del dedo predominante acababa abarcando la mitad de la anchura de la célula.

Sólo pude reproducir toscamente el experimento de Saffman. Llené con aceite de maíz parte de mi célula de Hele-Shaw; la puse luego de canto, para que el aceite se escurriera al fondo. Cuando el aceite se hubo asentado, tendí la célula en la mesa y abrí parcialmente la abrazadera central del lado que tenía más cerca. La consiguiente expansión repentina del espacio entre las placas impulsó el aceite en dirección hacia mí, rompiendo la interfase en un conjunto de dedos cortos. Dedos que también creé en otro experimento. Con el aceite introducido en la célula de modo que rodease el orificio central, metí por éste la punta de un tubo de cuentagotas y aspiré prestamente aceite. Así, al contraerse rápidamente la periferia de la masa de aceite hacia el orificio, se formaron dedos de aire.

A principios del año pasado, Tony Maxworthy, de la Universidad de California del Sur, comunicó un experimento parecido. Llenó parcialmente una célula con aceite de silicona, girándola para humedecer todo su interior. Luego la puso de canto. Cuando el aceite se hubo escurrido hasta el fondo y la interfase aceite-aire se hubo alisado, le dio la vuelta a la célula: el aceite quedaba encima del aire. En algunos ensayos, la orientación final de la célula era vertical; en otros, la disponía formando distintos ángulos con la horizontal.

Según el estudio de Taylor, cuando el fluido más viscoso se impele hacia el menos viscoso, la interfase es inestable únicamente si se mueve a una velocidad inferior a cierto valor crítico. En cada ángulo de inclinación probado por Maxworthy, la interfase, para ser estable, debía moverse con rapidez suficiente y, aun así, en cada ensayo se formaban dedos de aire que penetraban en el aceite en descenso. Por lo visto, al rotar inicialmente la célula para colocarla en la posición correspondiente a cada ensayo, la interfase comenzaba a moverse a baja velocidad, permitiendo la formación de dedos. Luego, cuando la velocidad sobrepasaba el valor crítico, la estabilización de la interfase tendía a favorecer el crecimiento de unos pocos dedos, a la vez que detenía el de los demás. Al final, se imponía uno de ellos.

Cuando se inclinaba la célula respecto a la horizontal en pocos grados, la separación entre los dedos era amplia y el dedo predominante se desarrollaba lentamente. Cuando la célula se ponía vertical, la separación interdigital se estrechaba y el dedo predominante crecía

con decisión. Además, los dedos se dividían en otros más pequeños, en un proceso conocido como bifurcación. Esto se debe a la gran velocidad de la interfase cuando la célula está vertical y al menguado intersticio entre placas.

El experimento admitía una fácil versión con una célula casera. Tras colocar ésta de canto, para que el aceite de maíz se escurriese hacia el fondo (con el orificio central taponado), le di la vuelta. Se formaron rápidamente ondas y, luego, dedos. Cuando los dedos de aire comenzaron a bifurcarse, puse la célula horizontal y los fotografié.

Repetí el experimento con otros líquidos. Uno de ellos fue Slime, gel que se vende en las jugueterías y que pertenece a una singular clase de líquidos conocidos como no newtonianos. Estos se caracterizan por su viscosidad, que varía cuando se les somete a esfuerzos, tanto normales como cortantes. En el caso del Slime, la viscosidad aumenta; por eso, le añadí un volumen de agua igual, agité la mezcla y con ella llené parcialmente la célula. Cuando le di a ésta la vuelta, se formaron inmediatamente en la interfase dedos de aire que se intercalaban con dedos de mezcla, más estrechos. La extremidad de cada dedo de líquido era una lágrima más ancha que el resto del dedo. Las melazas espesas creaban unos dedos líquidos similares, pero con unas lágrimas más acusadas y con unos dedos que tendían a estrujarse, pasado un rato, separándose de las lágrimas.

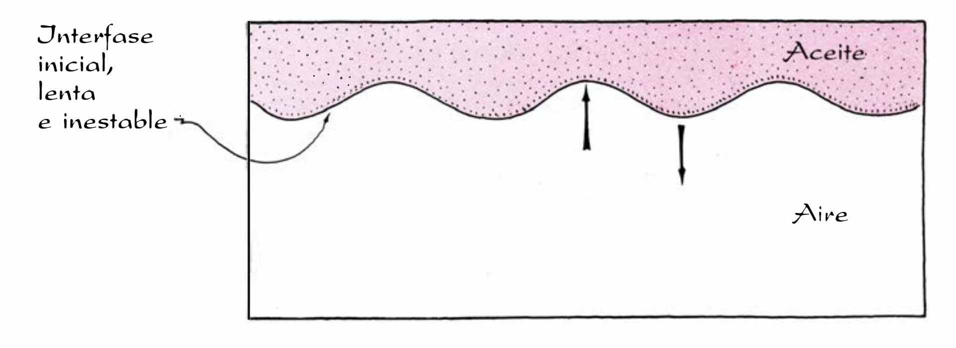
En otra serie de experimentos, inyecté agua teñida en varios líquidos encerrados en la célula: glicerina, aceite de maíz y melazas, entre otros. Como tintura empleé violeta de metilo, que mezclaba con el agua. Introducía a ésta, ya teñida, en la jeringa, con cuidado para que no entrara aire en su interior. Luego, inyectaba el agua teñida por el orificio central (empleando la aguja curvada), o por el separador de caucho alveolar del perímetro (empleando una aguja recta).

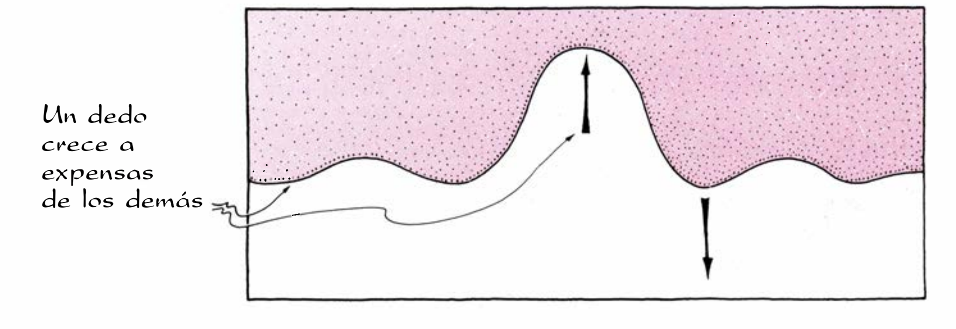
Cuando el agua teñida se inyecta por el centro, se extiende rápidamente, adoptando una bella configuración de lóbulos que se bifurcan repetidamente; cuando se inyecta por el costado, adopta una configuración similar, pero más parecida a un helecho. Lincoln Paterson, de Geomechanics, en Victoria (Australia), ha estudiado recientemente las estructuras que se forman cuando se inyecta agua teñida en glicerina. Descubrió así que el tamaño de las figuras más pequeñas que se forman en los lóbulos era de unas cuatro veces la separación entre las placas de la célula. Esta relación se debe a la naturaleza de las ondas que se generan en la interfase entre el agua y la glicerina. La onda más inestable, la que predomina en la formación de los lóbulos, tiene una longitud de onda que es del orden de cuatro veces la distancia entre las placas. El agua y la glicerina son miscibles, pero su difusión mutua se comporta con lentitud suficiente para que las configuraciones, una vez formadas, persistan el tiempo necesario para fotografiarlas.

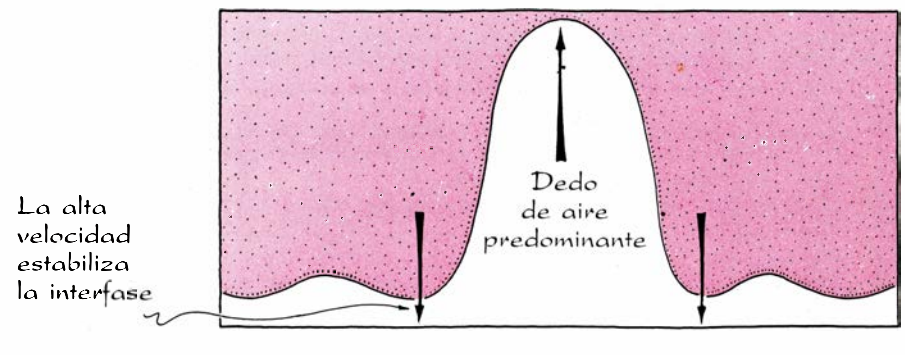
Obtuve las mejores configuraciones poniendo la célula derecha sobre un canto e inyectando el agua teñida a través del canto opuesto. Después de haberse esparcido el agua, parte de ésta cae a través de la glicerina, sufriendo numerosas bifurcaciones.

Paterson estudió también qué sucedía cuando se inyecta aire en la glicerina por el orificio central. En este caso, los fluidos (aire y glicerina) son inmiscibles. Según la teoría, para que la interfase entre dos fluidos inmiscibles sea inestable, las longitudes de onda de las ondas que se generen en la misma deben superar cierto umbral. Inicialmente, la pompa de aire es un círculo cuyo perímetro es demasiado pequeño para sustentar una onda cuya longitud de onda sea mayor que ese límite umbral. Así, la interfase no se torna inestable hasta que la pompa adquiere mayores proporciones. Entonces, se convierte en una figura en forma de flor, con unos pétalos que se bifurcan. Pude crear estas configuraciones introduciendo el tubo de cuentagotas por el orificio central y soplando aire por su interior. Estas configuraciones son difíciles de fotografiar en glicerina, dado el carácter translúcido de ésta; en melazas coloreadas y varios jarabes opacos son más pronunciadas.

En 1985, Johann Nittmann y Gérard Daccord, la sucursal francesa de Dowell Schlumberger, y H. Eugene Stanley, de la Universidad de Boston, informaron que habían producido dedos







8. Crecimiento de los dedos en aceite descendente

de tipo fractal inyectando agua teñida en una solución polimérica acuosa. Los dedos recordaban las ramificaciones de un árbol pelado, con unas ramas cortas y estrechas que salían del vástago principal. La solución polimérica era un polisacárido de gran masa molecular. Como la solución era acuosa, no existía tensión superficial entre la misma y el agua inyectada. Entonces, en ausencia de ese agente estabilizador, la interfase sufría cambios bruscos de dirección, originando así la configuración fractal.

Entre aquellos polisacáridos se contaban la celulosa, el glucógeno, la quitina y el almidón. Para tratar de reproducir los dedos fractales, investigué con una solución de agua y almidón común. Esta solución es no newtoniana y su viscosidad aumenta si se la somete a esfuerzos. Cuando era espesa, me resultaba imposible inyectarle el agua teñida. Lo logré con unas concentraciones de almidón menores: el agua teñida creaba unas configuraciones en forma de helecho que presentaban las mismas ramas gruesas y anchas bifurcaciones que ya había observado en mis experimentos anteriores. Conforme diluía más la concentración de almidón, las configuraciones se hacían cada vez menos interesantes, hasta que al final quedaba una simple elipse. Otros varios almidones me dieron unos resultados similares.

Me fue mejor con una mezcla de agua y celulosa. (La venden los establecimientos de productos químicos.) Para concentraciones moderadas de celulosa, el agua teñida que se inyecta forma unos dedos que se revuelven bruscamente, parecidos a los fotografiados por Nittmann, Daccord y Stanley, pero no tan estrechos.

Rebuscando otras sustancias en mi alacena, me decidí por averiguar qué pasaba con un pastel de gelatina. Una vez gelificado, introduje una pequeña cantidad en la célula y apreté gradualmente las abrazaderas hasta que la gelatina comenzó a rezumar entre las placas. Inyecté entonces agua teñida por un canto. Tras un momento de indecisión, el agua irrumpió por entre la gelatina, creando una hermosa figura fractal.

He esbozado las posibilidades de investigación que brinda la célula de Hele-Shaw. Tal vez resulte entretenido tantear con otros líquidos. Quizá pueden hallarse otras sustancias corrientes que generen configuraciones fractales. Por tratarse de un campo donde hay mucho por desbrozar, es muy posible que se descubran configuraciones enteramente nuevas.

Libros

Tiempo profundo, radioastronomía ilustrada y dietas y salud pública

L. Alonso, T. Roca, A. Mariné, M. C. Vidal y M. L. Izquierdo

TIME'S ARROW–TIME'S CYCLE. MYTH AND METAPHOR IN THE DISCOVERY OF GEOLOGICAL TIME, por Stephen Jay Gould. Cambridge; Harvard University Press, 1987. No importa que lo denunciara ya en 1931 Herbert Butterfield en su *Whig Interpretation of History*. Resulta deplorable leer todavía en nuestro país libros sobre la historia de la geología carentes de la perspectiva obligada en todo acercamiento al pasado: "El pecado de la composición histórica (de la mala, añadiríamos nosotros)... consiste en abstraer los acontecimientos de su contexto y compararlos con la situación actual, y operada esa manipulación, pretender que sean los hechos los que hablen por sí mismos." Este nuevo libro de Gould constituye, en ese punto, una bocanada de aire fresco, un antídoto contra viscosos sectarismos. Su lenguaje directo, su pasión por la teoría (es creador del llamado equilibrio puntuado o evolución por saltos discretos más o menos bruscos en el tiempo geológico) y su dominio de las humanidades confieren especial viveza a todas sus obras. Logra aquí integrar el tema de la dirección (del tiempo) con el de la circularidad del mismo (el mito del eterno retorno) dentro de un análisis interno de tres personajes de la historia de la geología: el "villano" Thomas Burnet, autor de una física sagrada (*Telluris theoria sacra*), y dos "héroes", James Hutton y Charles Lyell; las comillas están puestas con sorna, obviamente. Insiste, además, en una pauta metodológica hoy en barbecho: el análisis de textos. "Concedo valor al método venerable de la *explicación*. Las fuentes sociales y psicológicas de un libro son múltiples –razones de la aparición del mismo y de la preferencia de una visión del mundo y no de otra. Pero las grandes obras tienen también una lógica interna que invitan al análisis textual –como un argumento coherente y cerrado en sí mismo por la perspicacia de la visión y de la síntesis de una construcción acabada. Todas las piezas encajan, una vez nos hemos hecho con esa lógica central."

En cada autor reseñado parte del análisis de una ilustración. Así, comienza el capítulo dedicado a Burnet con la explicación del frontispicio de la obra citada antes, que representa las sucesivas etapas de la Tierra según el relato literal de la Biblia (la flecha del tiempo) para cerrarse al final de los siglos en el punto de arranque (circularidad del tiempo). Gould se detiene luego en la interpretación deformada, por simplista, que ese escrito recibe en los manuales: retrógrada, monstruosa, etc. La reivindicación que Gould, reputado paleontólogo de Harvard, hace de Burnet nada tiene que ver con sus interpretaciones de la naturaleza, evidentemente, sino con la ubicación en el saber y el estilo de su tiempo: "Burnet, cuyo tratado mereció un alto aprecio por parte de Newton, fue un representante ejemplar de un estilo académico ponderado en su época." (p. 27.) Se esfuerza por desentrañar las razones físicas que le inducen a crear su visión de la historia de la Tierra y los experimentos que realizó, y acaba el capítulo estableciendo un puente de conexión entre Burnet y Nicolaus Steno, autor danés del siglo XVII y pilar de geología moderna: ambos recurren a la Escritura y a la observación de la naturaleza para narrar la historia de la Tierra, invocan la misma teoría mecánica (la del colapso de la corteza) y explican el devenir de la Tierra como una suerte de combinación fascinante de direccionalidad (flecha del tiempo) y circularidad (repetición de fases).

James Hutton escribió su *Theory of the Earth* en 1795, y hubiera pasado inadvertido si no lo hubiera ensalzado su amigo y brillante prosista John Playfair en *Illustrations of the Huttonian Theory of the Earth* (1802), entusiasmado por la disconformidad que le había enseñado a interpretar. Una disconformidad es una superficie fósil de erosión, una transición temporal que separa dos episodios en la formación de las rocas; constituye, además, una prueba directa de que la historia de nuestro planeta abarca varios ciclos de deposición y levantamiento. A Hutton, gran parte de cuya obra está todavía inédita, se le debe, entre otras cosas, haber descubierto el carácter ígneo de muchas rocas, que se suponían de naturaleza sedimentaria. Asocia la Tierra a una máquina ingente y autorrenovadora, que repite sin cesar un ciclo de tres fases. Pero Gould se revuelve contra la aceptación acrítica del mito, que esquematiza así: "Se nos ha enseñado que Hutton pergeñó el principio del uniformitarismo, pobremente traducido en los manuales al uso mediante la expresión 'el presente es la clave para entender el pasado'. De acuerdo con esa guía, Hutton habría entonces observado, *primero*, que el granito tenía que ser una roca intrusiva, no una roca sedimentaria (una reflejo, pues, de las fuerzas de levantamiento y no un producto de desintegración); y, segundo, que las *disconformidades* aportan la prueba directa de ciclos *múltiples* de levantamiento y erosión." (p. 67.) La lectura de la obra de Hutton, por contra, abona la idea según la cual su teoría sería una solución *a priori* de un problema de causa final: los levantamientos deberían restablecer la topografía erosionada (p.73 ss.). Gould le recrimina un baldón que hoy puede aplicarse –y lo aplica él– a la biología y a la geología: no supo descubrir la fuerza, el valor y el carácter peculiar de la historia. Siguió la tradición que jerarquizaba las ciencias desde las más "duras" y "experimentales" (física y química) hasta las "blandas" y "descriptivas" (historia natural y sistemática). La geología reside en el centro de ese falso continuum y ha pretendido a menudo prestigiarse vistiéndose con el ropaje de las ciencias de estatuto superior e ignorando la indumentaria histórica que la caracteriza. Ese complejo, nacido de la baja estima propia, persiste en nuestros días.

El tercer libro analizado es *Principles of Geology* (1830-1833), de Charles

Lyell. Los manuales mitifican también a Lyell en unos estereotipos que se repiten sin criba: "héroe de la geología, rango que recibió al rescatar esta disciplina del dominio de una especulación vacía, de salón, teñida de argumentos teológicos, y la convirtió en una ciencia moderna asentada en la observación empírica y el trabajo de campo." (p. 103.) Por contra, Gould extrae de la lectura y examen de esos libros una tesis muy distinta: Lyell no era en absoluto un empirista imparcial, sino un pensador "partisan" comprometido en la defensa de la circularidad temporal ante un registro geológico que se oponía con vehemencia a un mundo carente de dirección, en particular en sus pruebas de un progreso orgánico de los peces a los reptiles, a los mamíferos y al hombre.

La verdad es que Gould se muestra especialmente duro con Lyell. Lo que no impide que reconozca su talla imponente (p. 179). Se supone que la verdad prevalece por la fuerza del razonamiento lógico y la riqueza de documentación, y no por la sonoridad de la retórica, ironiza. "Pero nunca entenderemos las razones del triunfo de Lyell si dejamos de lado el papel desempeñado por su habilidad verbal" (p. 107). En aras de la justicia, hemos de añadir que Gould prueba siempre sus iconoclastas afirmaciones. Con un manejo inteligente de las fuentes, recupera las notas escritas a lápiz por Agassiz en los márgenes de su ejemplar de los *Principles.* Contra el uniformitarismo y, con su agudeza habitual, la misma que le llevó a discernir los puntos débiles del *Origen de las especies* de Darwin, señala Agassiz: "Las causas (que operan en los fenómenos terrestres) son iguales como la causa que produce el buen tiempo es la misma que la que desencadena la tempestad. Pero a nadie se le ocurre disponerlas en la misma categoría. Siempre ha habido categorías diferentes de causas" (p.116). Uno a uno, Gould va arrojando de su pedestal al gremio de los lyellianos incondicionales; es una pena que no conozca el castellano; hubiera puesto también en la picota a Lucas Fernández Navarro, quien, en 1926, aportaba su grano de arena a los ditirambos estereotipados: "...la obra de Lyell ha sido una adquisición definitiva para la geología de todos los tiempos, y su espíritu informa todavía e informará por mucho tiempo las teorías en que se concrete el adelanto de la ciencia de la Tierra" (*Conferencias y reseñas científicas de la R. Soc. Esp. de Hist. Nat.*, 1926, p.69).

No son, concluye Gould, la flecha del tiempo –la historia– y la circularidad de los fenómenos dos procesos excluyentes, sino complementarios e implicados, como lo es la homología de los organismos que proceden de un mismo tronco y la analogía de los miembros que han desarrollado organismos de dispar estirpe.

Su estilo desenfadado, implacable contra maniqueos y superficiales, riguroso hasta el puntillismo en su análisis de los textos, hacen de esta obra un punto de referencia obligado y provoca, al propio tiempo, un sentimiento de desesperanza ante lo que la historiografía española e hispanoamericana ofrece en este campo. (L. A.)

THE INVISIBLE UNIVERSE REVEALED: THE STORY OF RADIOASTRONOMY, por Gerrit L. Verschuur. Berlín; Springer-Verlag, 1987. El libro trata de explicar sin tecnicismos el nacimiento y desarrollo de una disciplina científica: la radioastronomía. Esa rama de la ciencia, en sus poquísimos años de existencia, ha proporcionado ya una ingente cantidad de información, hasta el punto de ofrecer una nueva visión del universo, de los objetos que se encuentran en él y de los fenómenos físicos que en el mismo se producen. El libro, muy bien estructurado, consta de seis partes y apéndices. Estos últimos son de gran interés para el lector profano, pues explican tecnicismos y técnicas que el texto no puede ni debe eludir.

Este libro es una versión de un primer ensayo realizado por el mismo autor, *The invisible Universe: The story of Radioastronomy*, publicado en 1974. El cambio en el título con el añadido de una sola palabra ("Revealed") es significativo, puesto que en este tiempo la radiastronomía ha proporcionado la información necesaria para pasar de lo que entonces eran especulaciones a lo que ahora son teorías aceptables con bases observacionales firmes. Ello confiere a este segundo ensayo una claridad mayor en la exposición de ciertos temas (radiochorros, galaxias activas, etcétera) que hace una quincena de años eran puras especulaciones.

La primera parte o introducción es una presentación o repaso de lo que la radioastronomía abarca hasta el momento. Muy bien escrita, sitúa al lector en el área científica que después va a desarrollar. Las tres partes siguientes constituyen el asunto central del libro, donde va descubriendo con meticulosidad, evitando innecesarios tecnicismos pero sin perder rigor, el nuevo universo que ha sido posible descubrir con ayuda del estudio de las radioondas. De esta manera va exponiendo, de escala mayor a menor, todas las radiofuentes conocidas o de especial interés: radiogalaxias, cuásares y chorros cósmicos (fuentes extragalácticas), centro galáctico, nebulosas y medio interestelar (dentro de la galaxia), para terminar con los púlsares, superestrellas, Sol y planetas (fuentes estelares). Asimismo, explica de una manera sencilla los procesos físicos que se desarrollan en cada una de las fuentes y proporcionan la energía necesaria para producir la emisión de ondas electromagnéticas en el radio de frecuencias.

La parte quinta aborda el universo en su conjunto (la emisión de microondas del fondo cósmico) y los esfuerzos llevados a cabo, o en fase de proyecto, sobre la búsqueda de inteligencia extraterrestre. El primer tema quizá debería tratarse con un poco más de profundidad, dada la importancia de su contribución al establecimiento firme de la teoría de la gran explosión y el trabajo empeñado por los investigadores. El segundo peca un tanto de brevedad y de cautela.

El apartado sexto es un interesante tratado de las perspectivas, pasadas, presentes y futuras, de la radioastronomía escritas por un protagonista en el nacimiento y evolución de la misma. Con un estilo sugestivo, posee todas las características de quien narra vivencias y esperanzas, de quien lamenta las trabas a la expansión de una disciplina que ha dado información decisiva para el conocimiento del universo.

Resaltada la actualidad de la obra y la viveza de la exposición, es justo destacar también las ilustraciones que acompañan el texto y realizadas "casi ayer mismo", bien seleccionadas y con las oportunas aclaraciones para el lector. El autor salpica el relato científico de anécdotas que han hecho posible, también, el descubrimiento, y de las que no suele haber constancia escrita. (T. R.)

¿SALUD O FRAUDE? LA VERDAD SOBRE LOS ALIMENTOS Y LAS DIETAS, por Arnold E. Bender. Labor; Barcelona, 1987. La obra no sólo es oportuna sino que no es exagerado calificarla de necesaria. Su verdadero ámbito de interés, del que se desprende esta necesidad, queda ya parcialmente definido por la traducción literal del subtítulo original en inglés: "Health or hoax? The truth about health food and diets". La traducción al castellano de "health food and diets" ha quedado reducida a "alimentos y dietas", cuando en rigor seguramente debería haber

sido “alimentos y dietas salutíferos” o “alimentos y dietas sanos”. Esta omisión es relativamente explicable, ya que para el público español estas expresiones todavía no están tan divulgadas como en los países anglosajones y en otros.

En este libro, el autor va analizando de una forma clara y contundente algunos de los tópicos que en la actualidad circulan sobre la alimentación y los alimentos. Así, la primera parte del mismo está dedicada a los incorrectamente denominados “alimentos sanos” o “alimentos naturales” en contraposición a los alimentos “artificiales” o procesados. Bender nos invita a reflexionar sobre las razones que se argumentan en la promoción de estos productos que, desgraciadamente, hacen mella en un número importante de consumidores. Habitualmente la publicidad de estos alimentos se fundamenta en las posibles relaciones entre alimentación y salud; Bender, con ejemplos ilustrativos, desmitifica en cierto modo esta relación pero, sobre todo, se manifiesta abiertamente contrario a la atribución que se hace de presuntas propiedades curativas de determinados productos, que, como él mismo señala, sólo se diferencian de sus equivalentes convencionales u ordinarios en el precio, que suele ser bastante más elevado. Una parte cuantitativamente importante del libro está destinada a comentar algunos de estos “nuevos productos” (alimentos o similares), que no sólo no suelen ser nuevos, sino que en muchos casos su consumo se remonta a épocas o civilizaciones ahora redescubiertas en aspectos parciales, cuando no anecdóticos, no sólo relacionados con la alimentación.

Merece también una mención especial el capítulo quinto del libro, en el que bajo el título “Cuentos de viejas. ¿Ciertos o falsos?”, el autor analiza algunos mitos y falacias relacionados con la alimentación. Así, ofrece respuestas concisas, pero claras, a cuestiones del tenor siguiente: ¿comer cebollas evita el resfriado?, ¿es mejor la mantequilla amarilla que la más blanca?, ¿un cigarro después de las comidas ayuda a hacer la digestión?...

Señalemos que se dedica un capítulo a las vitaminas, en el que también se desmitifican algunas propiedades atribuidas a estos microcomponentes alimentarios, situándolos en su verdadero lugar, que ya de por sí es suficientemente importante como nutrientes esenciales que son. Por último, no podía faltar en este libro un capítulo consagrado al binomio dieta-adelgazamiento, tan actual cuan “vendible”. Después de un repaso a las dietas y métodos de adelgazamiento más divulgados llegamos a la conclusión de que no existe una panacea al respecto y que la única solución ante el problema de la obesidad reside en el aprendizaje de nuevos hábitos alimentarios, en los que se adapte la ingesta de calorías a las necesidades del individuo, salvo en el caso de patologías concretas.

En conjunto, el fenómeno al que este libro quiere salir al paso es ya un hecho en nuestro país, como en tantos otros. Nos encontramos ante una proliferación de informaciones en muchos casos erróneas o cuando menos sesgadas (y por tanto parcialmente erróneas o que pueden inducir a error) sobre las relaciones existentes entre alimentación y salud. Se trata de una situación en la que se plantea la duda de hasta dónde no se está abusando de la libertad de expresión o incluso incurriendo en publicidad deshonesta. En efecto, en muchos casos se propagan formas de alimentación que pueden perjudicar la salud o la economía de los ciudadanos, o bien se les alarma sin fundamento, tal como ha ocurrido con determinados informes, pretendidamente “científicos”, sobre la nocividad de los aditivos legalmente empleados.

El consumidor, lógicamente preocupado por su salud y bienestar, no siempre recibe una información solvente. Ello ocurre tanto a través de las diversas formas de promoción y publicidad como incluso por parte de presuntos “expertos en alimentación”, que de hecho no lo son, pero que encuentran acogida en los medios de comunicación social porque están más dispuestos a acudir a esas tribunas que los verdaderos especialistas en ciencias de los alimentos, nutrólogos y bromatólogos. Destaquemos que la credulidad en este campo afecta a muchos ciudadanos, independientemente de su nivel cultural en otros ámbitos, escaso en cuanto a alimentación se refiere. Los “señuelos” utilizados para inducir a error al consumidor consisten en prometer “milagros” en el sentido de larga vida, aumento de la potencia sexual, mantenimiento o consecución del peso ideal, preservación del cáncer, etc., mediante alimentos y dietas más o menos “originales o nuevas”, aunque en general lo que tienen de bueno no es original y lo que es original no suele ser bueno. Nos encontramos bajo la influencia de una moda que preconiza dietas no convencionales o que cuestiona, en mayor o

menor grado, los alimentos ordinarios promocionando otros que suelen calificarse de sanos, orgánicos, biológicos, naturales, integrales o incluso dietéticos, extendiendo en este último caso el concepto de dietético a unos productos que no revisten las características que corresponden a tal calificativo. Frecuentemente estos productos son comercializados por tiendas que se atribuyen la especialización de dietéticas y de régimen y a veces, incluso, a través de las farmacias, contribuyendo de este modo al uso ambiguo de unos términos que por su connotación desorientan al consumidor. Esta promoción se hace, en ocasiones, de buena fe y en otras con pretensiones estrictamente comerciales, para inducir la venta de productos que no necesariamente son perjudiciales si se consumen con moderación y que, con mucho, son diferentes pero no mejores que sus "equivalentes" convencionales.

La innovación o simplemente la variedad en la alimentación es, obviamente, una opción lícita y hasta aconsejable en muchos casos y no debe ser cuestionada por sistema. Como señala Bender, no se trata de poner objeciones a estos alimentos, sino a las propiedades que se les atribuyen. Así, estos productos no constituyen el remedio que contrarreste la relación entre nuestra dieta actual y algunas "enfermedades de la opulencia o de la civilización moderna", ya que la solución a este problema suele radicar en modificar nuestra dieta en el ámbito de los alimentos corrientes y no en alimentos especiales, salvo en casos ya bien determinados. No tiene justificación alguna que la población sana deba consumir suplementos vitamínicos, por ejemplo, sino que, si acaso, basta que aumente su ingestión de leche, frutas, hortalizas y derivados.

Bender en su libro analiza con nitidez esta situación, mezcla de ignorancia y esnobismo, para tal como él mismo afirma "aclarar hechos reales", con un estilo sencillo y directo, muy comprensible para el lector. No se trata de un texto científico en el sentido estricto, ni tampoco de un manual de introducción a la nutrición para el gran público, pero sí de una obra con datos científicamente comprobados y, al mismo tiempo, con un gran sentido común, que pretende situar en sus justos términos todo el cúmulo de tópicos, medias verdades y charlatanerías que nos invaden en el terreno de la alimentación. Creemos que sin lugar a dudas lo consigue con un texto ágil, a veces incluso sarcástico y duro con los promotores de ciertos tipos de productos. Sin embargo, con ello pone más en evidencia las falacias de estas modas y mitos sobre la alimentación no convencional, que suelen carecer de fundamento.

Cabe señalar, no obstante, que en ocasiones lo escueto y rotundo de las afirmaciones que Bender hace en su libro pueden comportar simplificación y esquematismo, de hecho inevitables en una obra que tiene la loable ambición de abordar todos los terrenos en los que se plantean estas falacias, que son muchos. La heterogeneidad de los temas se refleja también en una cierta falta de sistematización y en algunas reiteraciones. En cualquier caso, el índice final de conceptos facilita la localización de la información que, aunque condensada, es mucha y solvente.

La traducción respeta el estilo claro y directo del autor, aun cuando incluya algunas expresiones o terminologías discutibles, lo que no afecta una estimable tarea global. En definitiva, *¿Salud o fraude?* es una obra de divulgación científica escrita con claridad y rigor y hasta con apasionamiento, pero también con mucha sensatez, que se ocupa de unas cuestiones que no es exagerado calificar de candentes en estos momentos, en muchos países del mundo, entre ellos España, y que requerían ser tratadas por alguien con la autoridad y capacidad de comunicación de A. E. Bender. El autor ha cumplido con una de las responsabilidades del científico y del profesor universitario: acercar sus conocimientos y experiencias a la sociedad en general en un tema de inmediata y obvia repercusión en nuestra vida cotidiana. En cierto modo, este libro ofrece también una respuesta frente a unas formas de excesiva y desorientada preocupación por la salud, reflejo de una mentalidad aparentemente "moderna" pero en el fondo temerosa y conservadora.

Es una obra necesaria y de lectura obligada por parte de nutrólogos, bromatólogos y de todos los consumidores en general. Unos y otros encontrarán en ella información, temas de reflexión e incluso de actuación. En ésta, como en tantas otras cuestiones, sería muy conveniente que no fuera necesario escribir libros o artículos "a la contra" o para desmentir falsas informaciones, sino que el objetivo de las diversas publicaciones debería ser anticiparse y crear una sólida, fundamentada y a la vez crítica opinión en los ciudadanos sobre temas que les afectan. (AM, MCV y MLI.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

DIETA Y CANCER

Diet, Nutrition and Cancer. Committee on Diet, Nutrition, and Cancer, Assembly of Life Sciences. National Research Council, National Academy Press, 1982.

Pathological and Biochemical Aspects of Tumour Promotion. R. Marian Hicks en *Carcinogenesis*, vol. 4, n.º 10, págs. 1209-1214; 1983.

Diet and Cancer–an Overview. Walter C. Willett y Brian MacMahon en *The New England Journal of Medicine*, vol. 310, n.º 11, págs. 697-703; 15 de marzo de 1984.

The New Emphasis in Cancer Control. Peter Greenwald y Joseph W. Cullen en *Journal of the National Cancer Institute*, vol. 74, n.º 3, págs. 543-551; marzo, 1985.

Diet, Nutrition and Cancer: A Critical Evaluation. Dirigido por Bandaru S. Reddy y Leonard A. Cohen. CRC Press, 1986.

SUPERNOVAS RICAS EN HELIO

Type Ib Supernovae 1983n and 1985f: Oxygen-rich Late Time Spectra. C. M. Gaskell, E. Cappellaro, H. L. Dinerstein, D. R. Harkness y J. C. Wheeler en *The Astrophysical Journal*, vol. 305, n.º 2, parte 2.ª, págs. L77-L80; 15 de julio de 1986.

The Early Spectral Phase of Type Ib Supernovae: Evidence for Helium. R. P. Harkness, J. C. Wheeler et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 317, n.º 1, parte 1.ª, págs. 355-367; 1 de junio de 1987.

Supernova 1987A in the Large Magellanic Cloud: The Explosion of a ~20 *M*. Star Which Has Experienced Mass Loss? S. E. Woosley, P. A. Pinto, P. G. Martin y Thomas A. Weaver en *The Astrophysical Journal*, vol. 318, n.º 2, parte 1.ª, págs. 664-673; 15 de julio de 1987.

CROMOSOMAS ARTIFICIALES

Construction of Artificial Chromosomes in Yeast. Andrew W. Murray y Jack W. Szostak en *Nature*, vol. 305, n.º 5931, págs. 189-193; 15 de septiembre de 1983.

The Molecular Structure of Centromeres and Telomeres. E. H. Blackburn y J. W. Szostak en *Annual Review of Biochemistry*, vol. 53, págs. 163-194; 1984.

Chromosome Length Controls Mitotic Chromosome Segregation in Yeast. Andrew W. Murray, Neil P. Schultes y Jack W. Szostak en *Cell*, vol. 45, n.º 4, págs. 529-536; 1986.

RADIACION DE SINCROTRON

Synchrotron Radiation: Techniques and Applications. C. Kunz. Springer-Verlag, 1979.

Synchrotron Radiation Research. Dirigido por Herman Winick y S. Doniach. Plenum Press, 1980.

Synchrotron Radiation Research–an Overview. Arthur Bienenstock y Herman Winick en *Physics Today*, vol. 36, n.º 6, págs. 48-58; junio, 1983.

GENEALOGIA DEL PANDA GIGANTE

The Giant Panda: A Morphological Study of Evolutionary Mechanisms. Dwight D. Davis en *Fieldiana: Zoology Memoirs*, vol. 3; 1964.

On the Taxonomic and Phylogenetic Position of the Giant Panda *Ailuropoda melanoleuca*. V. E. Thenius en *Saugetierkundliche Mitteilungen*, vol. 44, págs. 286-305; 1979.

A Molecular Solution to the Riddle of the Giant Panda's Phylogeny. Stephen J. O'Brien, William G. Nash, David E. Wildt, Mitchell E. Bush y Raoul E. Benveniste en *Nature*, vol. 317, n.º 6033, págs. 140-144; 12 de septiembre de 1985.

DEMONIOS, MOTORES Y LA SEGUNDA LEY

Irreversibility and Heat Generation in the Computing Process. R. Landauer en *IBM Journal of Research and Development*, vol. 5, n.º 3, págs. 183-191; julio, 1961.

Science and Information Theory. Leon Brillouin. Academic Press, 1962.

The Thermodynamics of Computation–a Review. Charles H. Bennett en *International Journal of Theoretical Physics*, vol. 21, págs. 905-940; diciembre, 1982.

On the Decrease of Entropy in a Thermodynamic System by the Intervention of Intelligent Beings. Leo Szilard en *Quantum Theory and Measurement*, dirigido por John A. Wheeler y Wojciech H. Zurek. Princeton University Press, 1983.

LOS COMIENZOS DE LA AGRICULTURA EN EL NOROESTE DE EUROPA

Settlement and Economy in Neolithic Northern France. John M. Howell. B.A.R. International Series 157, British Archaeological Reports, 1983.

Ancient France: Neolithic Societies and Their Landscapes, 6000-2000 bc. Dirigido por Christopher Scarre. Edinburg University Press, 1983.

LA INTERFASE GAS-LIQUIDO

Interfacial Phenomena. J. T. Davies. Academic Press, 1961.

Turbulence Phenomena. J. T. Davies. Academic Press, 1972.

Physical Chemistry of Surfaces. Arthur W. Adamson. John Wiley & Sons, 1976.

Stress and Structure in Fluid Interfaces. H. T. Davis y L. E. Scriven en *Advances in Chemical Physics*, vol. XLIX. J. Wiley & Sons, 1982.

TALLER Y LABORATORIO

Fingering with Miscible Fluids in a Hele Shaw Cell. Lincoln Paterson en *The Physics of Fluids*, vol. 28, n.º 1, págs. 26-30; enero, 1985.

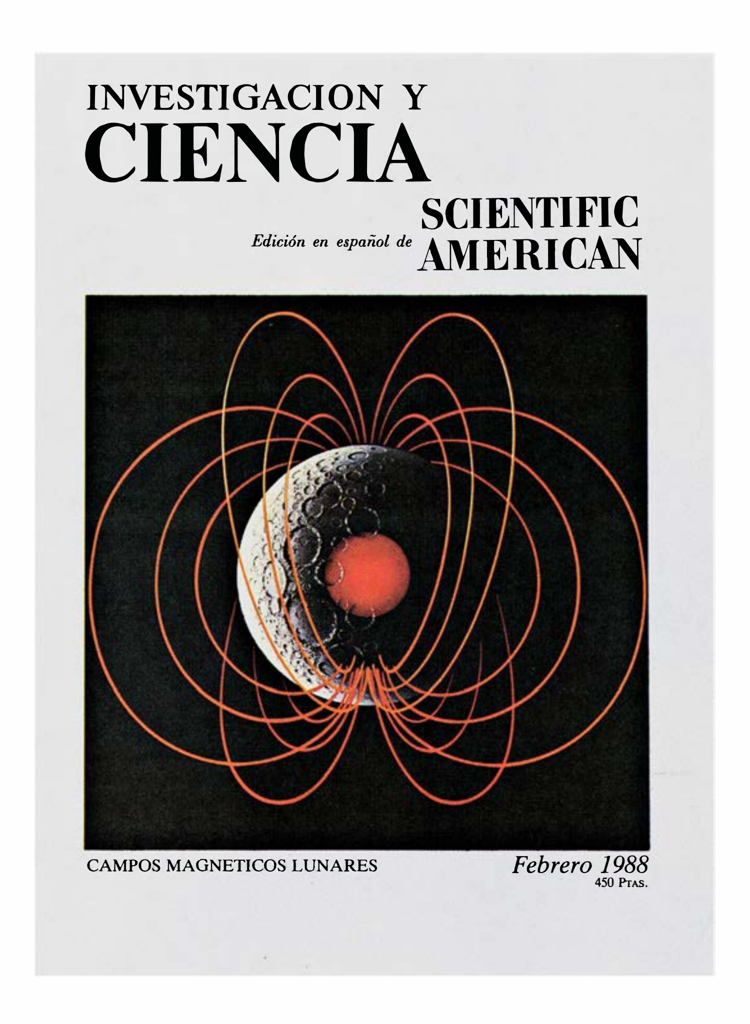
Fractal Growth of Viscous Fingers: Quantitative Characterization of a Fluid Instability Phenomenon. Johann Nittmann, Gérard Daccord y H. Eugene Stanley en *Nature*, vol. 314, n.º 6007, págs. 141-144; 14 de marzo de 1985.

The Nonlinear Growth of a Gravitationally Unstable Interface in a Hele-Shaw Cell. T. Maxworthy en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 177, págs. 207-232; abril, 1987.

JUEGOS DE ORDENADOR

The Beauty of Fractals. Heinz-Otto Peitgen y Peter H. Richter. Springer-Verlag, 1986.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



MOVIMIENTO DE LAS CELULAS ANIMALES, por Mark S. Bretscher
Transportan fragmentos de la membrana externa hacia el citoplasma y lo reciclan luego hasta la superficie. Los nutrientes llegan al interior celular por el mismo procedimiento.

ROTURA DE CRISTALES, por Terry A. Michalske y Bruce C. Bunker
Se acaban de conocer las interacciones que subyacen a las fracturas de los cristales. Su dominio permitirá evitar el crecimiento de las rajas de esos y otros materiales delicados.

CUERDAS COSMICAS, por Alexander Vilenkin
¿Por qué las estrellas y las galaxias están agrupadas y no se distribuyen uniformemente por el espacio? ¿Qué les induce a ello? Finas cuerdas de energía, creadas durante el inicio del universo, podrían haber instado esa atracción.

COMPUTACION Y CIRCUITOS NEUROMORFOS, por David W. Tank y John J. Hopfield
Los circuitos electrónicos que se fundan en modelos neurológicos están capacitados para resolver prestamente problemas complejos. Sus componentes se hallan trabados en un dispositivo reticular.

PALEOMAGNETISMO LUNAR, por S. K. Runcorn
La Luna, hoy un cuerpo muerto, generó antaño su propio campo magnético. Desde entonces se ha descentrado respecto al eje de rotación, tal vez por choques con sus propios satélites.

H.M.S. *WARRIOR*, por Walter Brownlee
Restaurado recientemente, después de un siglo largo de abandono, el H.M.S. Warrior *fue el primer buque de guerra con casco y coraza de hierro que existió. En su día hizo el papel de disuasor y, aunque desalentó las aspiraciones de algún posible enemigo, fue el origen de una verdadera carrera de armamentos.*

FLUCTUACIONES EN PROCESOS NATURALES, por José María Sancho
En los procesos naturales, físicos, químicos y biológicos, se observan fluctuaciones, de importancia extraordinaria, que no son explicables a partir de teorías deterministas.

EL CORTEJO DE LOS LAGARTOS UNISEXUALES, por David Crews
La especie de lagartos formada por sólo hembras constituye una situación única para estudiar la naturaleza y la evolución del comportamiento sexual.

